

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.01.08

研磨面平尺的相移干涉测量方法

王青, 顾洋

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 在平面度计量体系中, 研磨面平尺是重要的量值传递标准器。本文提出了利用相移干涉仪非接触、高采样密度及全自动化测量的特点, 采用标准平晶直接测量研磨面平尺以获得更高的测量精度的方法。子孔径分段测量后拼接方法, 以及斜入射测试方法, 均可以取消长平晶的过渡, 达到了量值传递扁平化的要求。文中以 $\Phi 150$ mm 相移干涉仪直接测量 300 mm 研磨面平尺为例, 介绍了两种测量方法的原理和测量结果, 并从中按标准要求提取了以稀疏点定义的平面度结果。对照检定规程, 分析了采用相移干涉仪测量结果的数据不确定度评价方法, 两种测量方法的归一化偏差小于 0.5。

关键词: 平面度; 长平晶; 研磨面平尺; 子孔径拼接; 斜入射

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)01-0038-05

Method for Verifying Milling Straight Edges Based on Phase Shifting Interferometer

WANG Qing, GU Yang

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 201194, China)

Abstract: Milling straight edges is currently a vital standard gauge for the verification items of flatness. Two methods for measuring milling straight edges based on phase shifting interferometer are put forward, whose advantages are non-contact, high sampling density and high accuracy frequency measurement. One is the sub-aperture stitching method; the other is the oblique incidence method. The simplification in verification items was achieved by using standard optical flat directly and long optical flat was excluded in the items. Take $\Phi 150$ mm phase shifting interferometer and 300 mm milling straight edge as an example, this paper introduces the principles and measuring results of the two methods, and gets flatness (sparse points) from the data of phase shifting interferometer to keep to the requirements of the verification regulation. Finally, the author summaries and estimates the uncertainty of measurement in contrast with the verification regulation. The normalized error of the two methods is less than 0.5.

Key words: flatness; long optical flat; milling straight edges; sub-aperture stitching; oblique incidence

1 相移干涉仪的测量原理

相移干涉仪是一种高精度的数字化测量仪器, 在近二十年发展快速, 已经成为平晶测量的主要仪器。

如图 1 所示, 相移干涉仪的光学系统与等厚干涉仪类似, 且可以在监视器上看到完全相同的等厚干涉条纹。但其机、电、控制与测量原理则复杂许多(如图 2 所示): 相移干涉仪的关键部件是移相器, 配合图像采集系统, 在两个平晶所构成的干涉腔中相位发生变化时采集多幅光强图进行阵列测量点上的运算, 并从中解算出与干涉腔的光程差(面形变化)相对的应初始相位。因此相移干涉仪的横向分辨率取决光学系统传函和 CCD 像素采样密度, 在 150 mm 测量口径下, 分辨力可以达到 0.2~0.3 mm。相移算法有许多, 最简单的是四步法, 即在每次相移 $\frac{\pi}{2}$ 的情况下, 采集四幅光强图

($0, \frac{\pi}{2}, \pi$ 和 $\frac{3\pi}{2}$)。某一个采样点的光强分别为

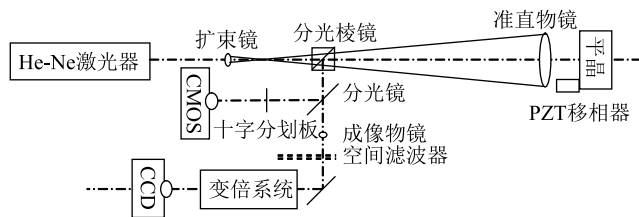


图 1 菲索型相移干涉仪主机光学原理图

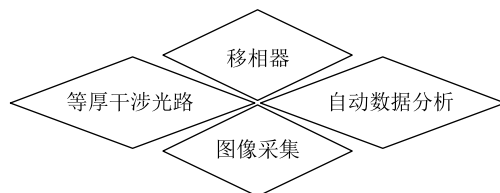


图 2 相移干涉仪原理框图

$$\begin{cases} I_0(x, y) = I_d(x, y) + I_a(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_1(x, y) = I_d(x, y) + I_a(x, y) \cos[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}] = I_d(x, y) - I_a(x, y) \sin[\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) = I_d(x, y) + I_a(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] = I_d(x, y) - I_a(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_3(x, y) = I_d(x, y) + I_a(x, y) \cos[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}] = I_d(x, y) + I_a(x, y) \sin[\phi(x, y)] \end{cases} \quad (1)$$

所以初始相位为

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)}\right) \quad (2)$$

当忽略干涉腔中空气折射率不均匀性时，两个平面在 (x, y) 点的高程(小数部分)为

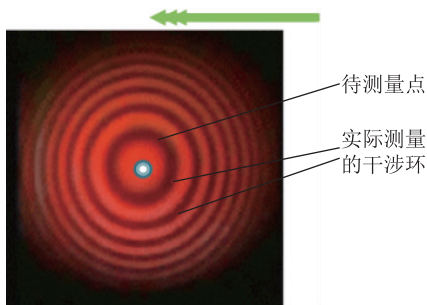
$$d(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi(x, y) \quad (3)$$

由于式(2)中含有减法和除法，所以干涉场中背景光强、固定噪声、面阵探测器的不一致性等影响均自动消除，这是移相干涉测量的一大优点。而高密度的采样点阵，决定了两个相邻采样点上的高程差异不会超过半个波长，因此可以通过加减半个波长的方法来克服式(2)中的相位跃变影响。

一般来说，等倾干涉仪^[1]的测量精密(测量点)但不准确(全面域)、等厚干涉仪^[2]则相反，准确(全面域)但不精密(无法获得单个点的值)。如图3所示，对比于等倾干涉仪的稀疏测量点，相移干涉仪在单个测量点位上具有同样的精密性；对比于等厚干涉的干涉条纹判读方法，相移干涉仪在全面形测量上具有同样的准确度。

| | | |
|---------------|-------------|---------------|
| $d(x-1, y-1)$ | $d(x, y-1)$ | $d(x+1, y-1)$ |
| $d(x-1, y)$ | $d(x, y)$ | $d(x+1, y)$ |
| $d(x-1, y+1)$ | $d(x, y+1)$ | $d(x+1, y+1)$ |

注：相移干涉仪，采样点间隔<1mm



注：等倾干涉仪，采样间隔15~30 mm，分辨力(干涉环直径5~8 mm)

图3 相移干涉仪与等倾干涉仪的采样点比较

2 利用相移干涉仪的拼接测量方法

用相移干涉仪测量长尺寸被测件时，最简单的方法是制造一台口径达到相应长度的干涉仪(300~500 mm)。然而相移干涉仪在口径从 $\Phi 150$ mm 上升到 $\Phi 300$ mm 时，干涉仪主机的价格上升了2.5倍，标准平晶价格上升了5倍。因此使用 $\Phi 150$ mm 相移干涉仪，使用拼接或斜入射测量方法进行测量是性价比最高的。

从子孔径数目和测量精度两个方面来说，200~300 mm 的长平晶或研磨面平尺是少数适合用于子孔径拼接方法进行测量的原件之一。在 $\Phi 150$ mm 测试口径下，其子孔径分布如图4所示。

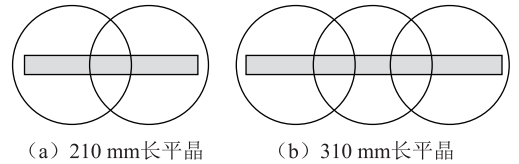


图4 长平晶测量中的子孔径分布

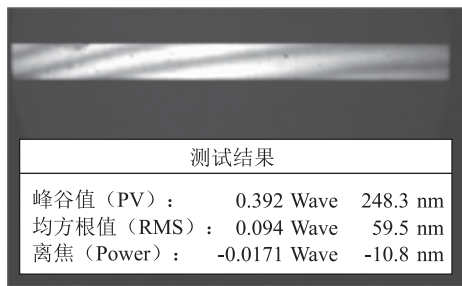
如果不考虑标准平晶的面形误差，或已经对标准平晶误差进行了修正^[3]，那么可以认为在重叠区域的2次测试结果差异只与倾斜调整有关，即

$$W_2(x, y) - W_1(x, y) = ax + by + c \quad (4)$$

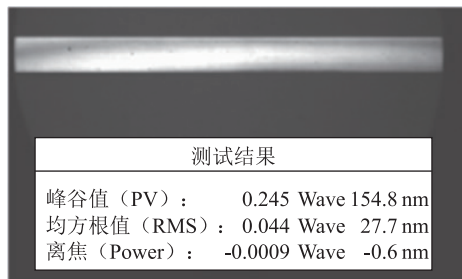
式(4)中有3个未知量，如果分别对重叠区域进行消倾斜操作，则可以得到两个波前各自的倾斜系数 (a_1, b_1, c_1) 和 (a_2, b_2, c_2) ，于是相对调整差异就可以得到

$$\begin{cases} \Delta_a = a_2 - a_1 \\ \Delta_b = b_2 - b_1 \\ \Delta_c = c_2 - c_1 \end{cases} \quad (5)$$

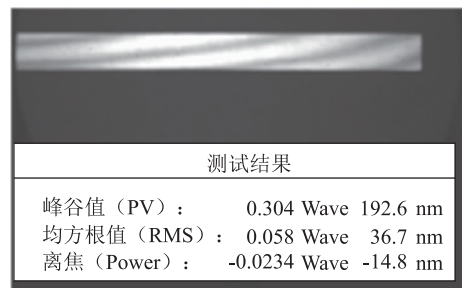
子孔径2的所有有效测试区域，按 $(\Delta_a, \Delta_b, \Delta_c)$ 消除与子孔径1的相对倾斜系数后，就可以进行坐标平移，并将两次测得结果统一，获得被测件全口径的面形数据。图5为300 mm 研磨面平尺的三个子孔径测试结果，表1为按研磨面平尺检定规程^[4]的采样数据(直接采样值，未消倾斜)和拼接结果。拼接的流程为：两端子孔径端点对准(横向及高度)→两端子孔径倾斜调整(由重叠点计算倾斜量)→拼接，获得11个数据→消倾斜(端点归零)。



(a) 子孔径3 (左)



(b) 子孔径2 (中)



(c) 子孔径1 (右)

图5 研磨面平尺测量实例

注: 子孔径偏移量 100 mm, 右端留空

表1 研磨面平尺测量采样数据与拼接结果

| 序号 | 位置/mm | 采样/ μm | | | 结果/ μm |
|----|-------|-------------------|-------|--------|-------------------|
| | | 左边 | 中间 | 右边 | |
| 1 | 15 | 0.416 | — | — | 0.000 |
| 2 | 45 | 0.702 | — | — | 0.210 |
| 3 | 75 | 0.866 | — | — | 0.299 |
| 4 | 105 | 0.984 | 0.355 | — | 0.340 |
| 5 | 135 | 1.061 | 0.391 | — | 0.342 |
| 6 | 150 | — | 0.406 | — | 0.341 |
| 7 | 165 | — | 0.428 | -0.208 | 0.346 |
| 8 | 195 | — | 0.437 | -0.279 | 0.320 |
| 9 | 225 | — | — | -0.343 | 0.303 |
| 10 | 255 | — | — | -0.485 | 0.206 |
| 11 | 285 | — | — | -0.738 | 0.000 |

注: 平面度为 $0.346 \mu\text{m}$

3 利用相移干涉仪的斜入射测试方法

通过将长方形被测件的倾斜放置, 可以使较小口

径(如 $\Phi 150 \text{ mm}$)的干涉仪输出光束覆盖全部被测表面, 即斜入射测试方法。斜入射测试需要使用一对圆平晶: 一个为非镀膜普通标准平晶, 另一个为高反射的标准反射镜(反射率需匹配被测件的斜入射反射率), 测试光路如图6。

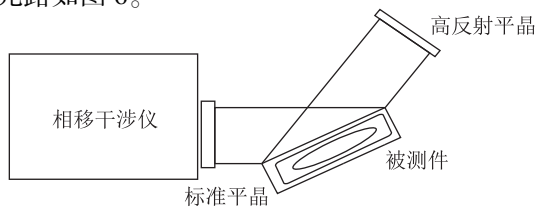


图6 研磨面平尺的斜入射测试

在斜入射测试中, 干涉仪的准直光经过研磨面平尺待测表面反射两次, 因此研磨面平尺的测试结果 $W_L(x, y)$ 并非是相移干涉仪直接获得的波前 $W_0(x, y)$ 。如图7所示, 当表面凹凸变化为 h 时, 光程变化为 $\Delta = AB - AC$ 。考虑到光线的入射角度为 θ , 则有根据三角函数的变换, 有

$$\begin{aligned} \Delta &= AB - AC \\ &= \frac{h}{\cos\theta} - AB \cdot \cos(\pi - 2\theta) \\ &= \frac{h}{\cos\theta} (1 + \cos(2\theta)) \\ &= 2h \cos\theta \end{aligned} \tag{6}$$

于是, 一个进行转换的比例系数就可以确定了。

$$W_L\left(\frac{x}{\cos\theta}, y\right) = \frac{h}{\Delta} W_0(x, y) = \frac{1}{2\cos\theta} W_0(x, y) \tag{7}$$

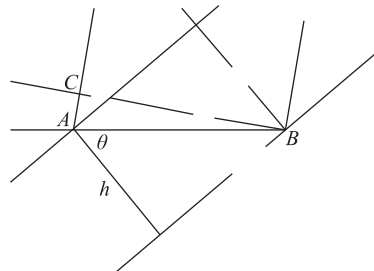


图7 斜入射测试中的比例变换

式(7)中, 入射角 θ 是一个重要的参数, 一般有两种方法来获得: 一是直接测量角度值, 如制造一个带圆光栅的调整架; 二是通过图像分析方法, 获得长方形被测表面在 x 方向上的压缩比。后一种方法简单可行, 通过标定干涉仪的像素格值和测量研磨面平尺干涉图像在横向上所占的像素值就可以了。

$$\cos\theta = \frac{D}{L} \cdot \frac{P_2}{P_1} \tag{8}$$

式中: D 为干涉仪口径; L 为研磨面平尺的长度; P_1 和 P_2 分别为在干涉图像上干涉仪口径与研磨面平尺的图

像像素数目。

于是式(7)可写成

$$W_L(x/(D/P_1), y) = \frac{LP_1}{2DP_2} W_0(x, y) = kW_0(x, y) \quad (9)$$

斜入射测量的干涉图与测试结果如图 8 所示, 表 2 给出了转换过后的结果。

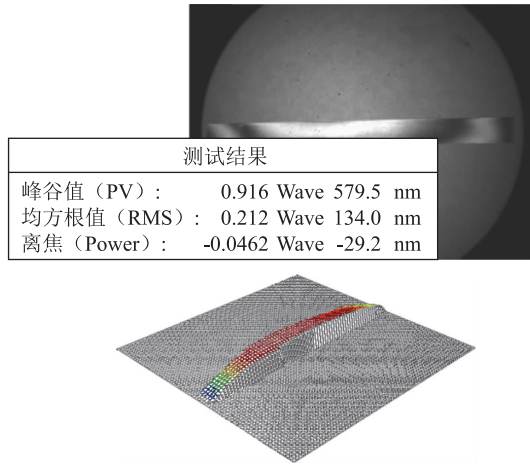


图 8 斜入射测试干涉图与三维图

本次测量过程, 在像素坐标下, 横向采样得到干涉仪孔径位置为 33~332、研磨面平尺位置为 37~322。

因此 $P_1 = 332 - 33 = 299$, $P_2 = 322 - 37 = 285$; 于是

$$k = \frac{LP_1}{2DP_2} = \frac{300.5 \times 299}{2 \times 150 \times 285} = 1.051$$

表 2 斜入射测试采样及运算结果

| 测点/mm | 采样值/ μm | 归一化/ μm | 斜变换/ μm |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 15 | -0.249 | 0.000 | 0.000 |
| 45 | -0.024 | 0.221 | 0.232 |
| 75 | 0.094 | 0.334 | 0.351 |
| 105 | 0.136 | 0.372 | 0.391 |
| 135 | 0.131 | 0.362 | 0.380 |
| 150 | 0.120 | 0.348 | 0.366 |
| 165 | 0.113 | 0.339 | 0.356 |
| 195 | 0.076 | 0.298 | 0.313 |
| 225 | 0.042 | 0.259 | 0.272 |
| 255 | -0.040 | 0.172 | 0.181 |
| 285 | -0.208 | 0.000 | 0.000 |

注: 平面度为 0.391 μm

4 测量结果的分析

采用相移干涉仪对研磨面平尺的 2 种测量过程, 可以仿照研磨面平尺的检定规程进行测量不确定度估算, 如表 3 所示。

表 3 测量不确定度概况和估算 ($L = 300 \text{ mm}$)

| 序号 | 符号 | 不确定度 | 说明 |
|----|----------|--------------------|--|
| 1 | U_{dw} | 测量点定位误差 | 拼接测量中, 由相移干涉仪与被测研磨面平尺纵、横向定位误差引起。此误差估算不超过 0.5 mm, 引起的变化限为标准平晶的平面度的差分, 估算为 0.006 μm 。对于每次子孔径定位都会引起独立的误差 U_{dw} , 非相关、分布系数 0.5, 因此 $U_{dw} = 0.006 \times 0.5 \times \sqrt{3} = 0.005 (\mu\text{m})$ |
| 2 | U_{p1} | 像素格值标定误差 | 通过一个标准尺寸物体(或已知干涉仪口径), 可以标定像素格值, 并用于斜入射测量中的变换系数计算。此误差与与像素判读相关, 在 640 采样密度下估算为 2 个像素。根据式(8), 假设 W_0 为 0.7 μm , D 为 150 mm, L 为 300 μm , P_2 为 400, 于是 $U_{p1} = 0.002 \mu\text{m}$ |
| 3 | U_{p2} | 图像识别误差 | 对于斜入射测量, 研磨面平尺干涉图像识别误差一般不大于 5 个像素。根据式(8), 假设 W_0 为 0.7 μm , D 为 150 mm, L 为 300 μm , P_1/P_2 均为 400, 于是 $U_{p2} = 0.002 \mu\text{m}$ |
| 4 | U_{gr} | 相移干涉仪波前测量重复性 | 合格的相移干涉仪可以在常规的计量测试环境中达到 $PV < 0.006 \mu\text{m} (\lambda/100)$ 的测量重复性。在 300 mm 研磨面平尺拼接测试中, 需要非相关的 3 次测量、按分布因子 0.5 计算, $U_{gr} = 0.006 \times 0.5 \times \sqrt{3} = 0.005 (\mu\text{m})$ 在倾斜测量中, 由于光程更长, 测量重复性为 0.01 μm , 因此 $U_{gr} = 0.01 \times 0.5 = 0.005 (\mu\text{m})$ |
| 5 | U_{nb} | 扰度变形 | 主要考虑研磨面平尺、标准长平晶因自重引起的扰度变形。因为卧式相移干涉仪平晶和研磨面平尺均垂直放置, 此项可以忽略。 |
| 6 | U_{kt} | 温度变化 | 主要考虑温度变化对长平晶与研磨面平尺的影响, 按规程 0.05° 对 300 mm 研磨面平尺的影响为: $U_{kt} = 0.022 \mu\text{m}$ |
| 7 | U_{pp} | 标准平晶工作面平面度 | 主要考虑标准平晶平面度的测量不确定度(0.01 μm) 的影响。对斜入射测量来说, 需要两块标准平晶, 非相关、分布因子 0.5, $U_{pp} = 0.01 \times 0.5 \times \sqrt{2} = 0.007 (\mu\text{m})$ 对拼接测量来说, 三次测量相关, 因此 $U_{pp} = 0.01 \times 0.5 \times 3 = 0.015 (\mu\text{m})$ |
| 8 | U_{fd} | 分段测量 | 分段测量结果在拼接时, 需要考虑标准平晶剩余误差的幂倍增。对于 $D = 150 \text{ mm}$ 的干涉仪测量 $L = 300 \text{ mm}$ 的平晶, 按剩余球面误差 0.006 μm , 幂相关、分布系数 0.5 计算 $U_{fd} = 0.006 \times 0.5 \times (300/150)^2 = 0.012 (\mu\text{m})$ |
| | | 合成标准不确定度 U_C | 拼接测量: 0.030 μm ; 斜入射测量: 0.024 μm |
| | | 近似不确定度 $U_E (k=3)$ | 拼接测量: 0.090 μm ; 斜入射测量: 0.071 μm |

研磨面平尺的拼接测试和斜入射测试差异为 0.045 μm，截面的轮廓一致性好，如图 9 所示，两种测量方法的归一化偏差^[5] En 值小于 1，说明测量结果在合理预期之内。

$$En = \frac{0.391 - 0.346}{2 \times \sqrt{0.030^2 + 0.024^2}} = 0.45$$

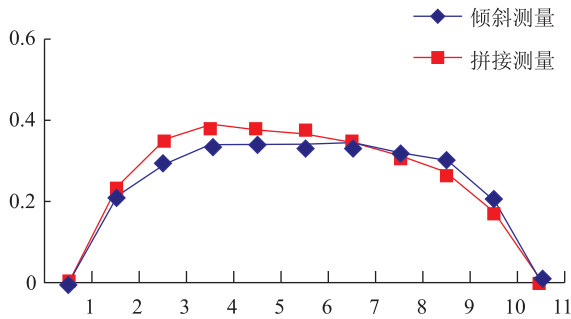


图 9 利用相移干涉仪的两种方法的研磨面平尺测量结果

参 考 文 献

[1] 国家质量监督检验检疫总局，国家标准化管理委员会 . JJG 661-2004 平面等倾干涉仪检定规程[S]. 北京：中国计量出版社，2004.

[2] 徐德衍，王青，高志山，等 . 现行光学元件检测与国际标

准[M]. 北京：科学出版社，2009.

[3] 王青，徐新华，陈磊，等 . 一种子孔径拼接系统中系统误差的修正方法：201110106489.7[P].

[4] 国家质量监督检验检疫总局，国家标准化管理委员会 . JJG 740-2005 研磨面平尺检定规程[S]. 北京：中国计量出版社，2005.

[5] 国家质量监督检验检疫总局，国家标准化管理委员会 . JJF 1117-2010 计量比对技术规范[S]. 北京：中国计量出版社，2010.

收稿日期：2017-09-19；修回日期：2017-12-18

基金项目：国家重大仪器专项开发(2013YQ150829)



王青(1963-)，江苏苏州人，九三学社成员，江苏省计量测试学会理事，江苏省标准化协会理事，南京技术监督光学产品质量检验站副站长，中国光学学会光学会员，中国计量学会高级会员。主要研究方向为光学测量、光学计量、薄膜光学。

1985 年，毕业于中山大学物理系；博士就读于南京理工大学电子工程与光电技术学院；现于南京理工大学 2011 先进发射协同创新中心任主任助理；出版多本教材，并获得 10 多项国家和省部级科技进步奖励。

三坐标测量机测量检测方法培训在深圳顺利举行

2018 年 1 月 10 日，“三坐标测量机测量检测方法及相关国家标准/校准规范宣贯”高级培训班在深圳开班。本次培训主要内容有“三坐标测量机校准和验收方面的有关内容”、“与测量任务相关的国内外标准解读”、“几何坐标测量技术应用案例研讨”及“深入深圳市计量质量检测研究院、深圳市中图仪器股份有限公司进行技术交流，解决实际工作中遇到的问题”。

1 月 12 日上午，培训班专家和学员一行 50 余人到访中图仪器。首先参观展厅，参观过程中，激光干涉仪、白光干涉仪、轮廓测量仪、测长机等测量仪器吸引了众多目光，大家不时对这些测量仪器的实际应用、技术参数、性能优势等与工作人员探讨交流。随后，一行人员来到会议室进行座谈，中图仪器股份有限公司领导从公司的基本概况、创新技术、创新产品及未来发展规划等方面向大家作了详细介绍。此次参加培训的专家和学员，多是中图仪器的老客户，见证了中图仪器的成长，对于该公司引领国产测量仪器的突破

和快速发展表示赞赏。



临别之际，专家和学员表示与中图仪器有着更广阔的合作空间，并期待中图仪器能够研发生产更多先进的测量仪器，为中国制造产业升级提供助力。

(罗健)