

《光磁共振测量广州地磁场》

院系： 物理与电信工程学院

专业： 物理学（师范）

姓名： 高洁瑜

班级： 14级 1A

学号： 20140003013

2017年6月

光磁共振测量广州地磁场

高洁瑜

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广东广州 510006)

摘要: 光泵磁共振是利用光抽运效应来研究原子超精细结构塞曼能级间的磁共振。本实验基于光磁共振实验设备, 设计了测量地磁场水平分量 and 垂直分量的实验方法, 并应用两种方法测磁场的水平分量, 实际测量了广州地区的地磁场强度为 $2.16 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。与实际值作对比, 可认为测得的实验结果与实际值相吻合, 结果较准确, 用光磁共振测地磁场是可行的。

关键词: 光抽运; 磁共振; 地磁场

Optical magnetic resonance magnetic field measurement in Guangzhou

Gao Jieyu

(School of Physics & Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Optical pumping resonance is used to study the magnetic resonance between atomic Hyperfine Structures and Zeeman energy levels by using optical pumping effects. The experimental equipment based on magnetic resonance, the experimental method is designed to measure the magnetic field horizontal component and vertical component, and the application of two methods of measuring the horizontal component of the magnetic field, the actual measurement of the Guangzhou region to the magnetic field strength of $2.16 \times 10^{-5} \text{ T}$. Compared with the actual value, that the measured experimental results are consistent with the actual value, the result is accurate, with magnetic resonance measuring magnetic field is feasible.

Key words: Optical pumping; magnetic resonance; geomagnetic field

1. 引言

1950年, 法国物理学家卡斯特勒提出光抽运方法, 并将光抽运应用于磁共振信号的检测。光磁共振是近代物理实验中的重要实验, 该实验将光抽运过程和射频磁共振结合起来, 可测量原子、分子能级的精细和超精细结构, 能检测微弱的磁场信号, 广泛应用于弱磁场强度的测量, 例如测量地磁场强度。基本思想是: 充分利用光抽运效应使处于磁场中的原子在各塞曼能级上的分布出现粒子数反转的现象; 粒子数反转后, 在垂直于静磁场和光传播方向上加一个射频振荡的磁场, 当射频光子的能量等于塞曼能级间的能级差时, 将发生磁共振现象。

地磁场对人类的生产和生活有着重要的影响, 目前测量磁场常用的方法是利用特斯拉计和基于光磁共振原理的磁强计等。特斯拉计测量磁场操作方便快捷, 但对于弱磁场的测量误差大。在实验室里没有精确度较高的磁强计, 主要是借助光磁共振实验仪分别测出地磁场的水平分量和垂直分量, 再合成地磁场强度, 可以较为准确地测出地磁场强度。

本文主要介绍了利用光磁共振实验设备设计地磁场强度测量实验, 并实际测量了广州市的地磁场强度。

2. 实验原理

2.1 光磁共振

光磁共振实验是大学近代物理实验中非常重要的实验项目之一, 实验装置主体单元如图1所示。

光泵磁共振是采用光泵的方法, 即用光的照射来打破原子在所研究能级间的热平衡状态, 造成所期望的集居数差, 再通过磁共振, 最后用光探测的方法来研究原子精细结构的一种实验技术。

在热平衡状态下，各能级的粒子数遵从玻尔兹曼分布，分布规律满足：

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \approx 1 - \frac{\Delta E}{kT} \quad (1)$$

由于超精细塞曼能级间的能量差 ΔE 很小，可近似地认为这些能级上的粒子数是相等的。这很不利于这些子能级之间的磁共振现象。为此，用光抽运方法，即用圆偏振光激发原子，使原子能级的粒子数分布发生重大改变。

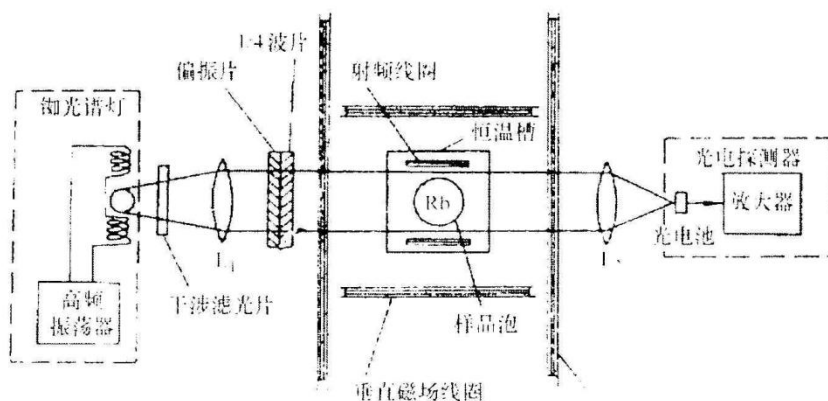


图1 实验装置主体单元示意图

将含有 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 蒸气的铷蒸气泡置于可调磁场中，Rb原子能级在磁场中产生塞曼分裂，能级裂距为 $g_F \mu_B B_0$ ，其中 μ_B 为玻尔磁子， B_0 为磁场强度。将铷光谱灯产生的出射光调制或圆偏振光并照射到Rb蒸气泡上。光照射后，处于磁场中的Rb原子吸收圆偏振光，使得较低的子能级上的Rb原子逐步被抽运到最高的子能级上，出现粒子数反转的现象，这就是光抽运效应。用信号发生器输出频率为 ν 的射频信号，并施加到Rb蒸气泡周围的射频线圈上产生射频振荡的磁场，射频光子的能量为 $h\nu$ ，其中 h 为普朗克常数调节射频信号的频率，当满足条件：

$$h\nu = g_F \mu_B B_0 \quad (2)$$

就会发生磁共振现象。磁共振使Rb原子在各塞曼子能级上重新恢复为均匀分布，从而增加了对圆偏振光的吸收。通过光探头测量透射光的强度并使用示波器实时显示光探头的输出电压信号，就可以看到磁共振的共振峰。此刻对共振信号进行检测，并用光探测器接收透射光强度的变化、转化为电信号，便获得光泵磁共振信号，且信号功率被提高了7-8个数量级，检测灵敏度大为提高。

3. 实验方案

3.1 光磁共振实验装置

整个实验装置的方框图如图2所示，由光泵磁共振实验装置的主体单元及其辅助设备（包括辅助源、射频信号发生器、频率计和示波器等）组成。



图2 光磁共振实验装置框图

3.2 地磁场垂直分量 B_{\perp} 的测量

地磁场垂直分量 B_{\perp} 的测量可通过观察光抽运信号实现。

由于观测光抽运信号的扫场较弱，所以地磁场的大小足以产生很大的影响。通过利用指南针判别扫场方向置向，使得扫场的磁场与地磁场水平分量反向。再利用光抽运信号判别垂直磁场开关置向，使垂直恒定磁场与地磁场垂直分量反向。缓慢调节垂直扫场方波，当合成垂直磁场不为零时，方波扫场的正反向磁场幅度不同（如图3（b）（c））；当地磁场垂直分量被抵消使合成垂直磁场为零时，观测到光抽运信号有最大值，正反向磁场幅度相同（如图3（a））。（把三角波和方波加到扫场线圈均可观测光抽运信号，但方波能较快地通过零点建立正向或反向磁场，故观察光抽运信号时常用方波扫场）。

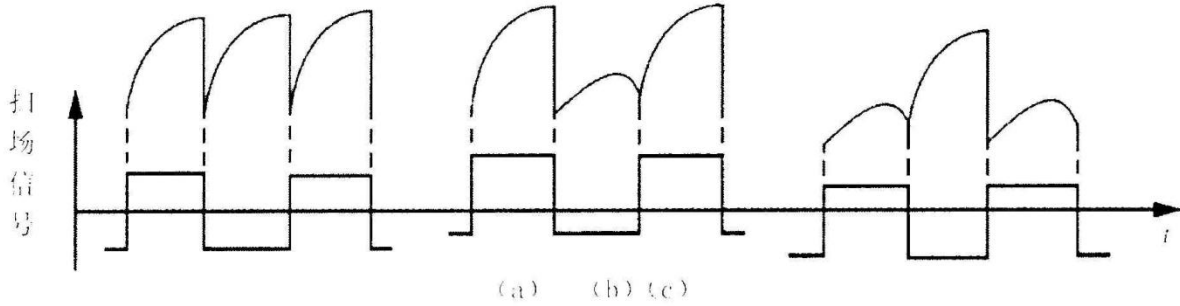


图3 光抽运信号和扫场信号

根据光抽运信号的波形变化，经过反复调节，即可确定方波的幅度、垂直磁场线圈的励磁电流的大小和方向。根据电压值及亥姆霍兹线圈参数计算对应磁场：

$$B_{\perp} = 4.496 \times \frac{NV}{rR} \times 10^{-7}(T) \quad (3)$$

式中 N 为线圈每边匝数， R 为线圈每边绕线的电阻（ Ω ）， r 为线圈有效半径（ m ）， V 为加到线圈上的直流电压（ V ）。

3.2 地磁场水平分量 B_{\parallel} 的测量

3.2.1 测量 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 朗德因子 g_F 值

在光抽运的基础上，施加一垂直于恒定磁场 B_0 的射频场 B_1 作用于样品，并采用三角波扫场。对应于射频场 B_1 ，磁共振条件表示为：

$$g_F = \frac{h\nu}{\mu_B B_0} \quad (4)$$

只要测定共振频率 ν 与磁场 B_0 的响应值，则可求得 g_F 因子。

由于本实验是在弱磁场作用下的磁共振实验，地磁场水平分量与扫场直流分量影响不可忽略，由施加到水平轴向的亥姆霍兹线圈上的电压 V 来求得的磁场值不完全等于共振磁场 B_0 ，结果存在系统误差。采用使施加的水平恒场换向的方法消除。分别测出两个方向的共振频率，并取平均值作为该恒定磁场对应的共振频率，可抵消地磁场水平分量和扫场直流分量的影响。

3.2.2 等间距扫场法测 B_{\parallel}

采用改变射频场频率的方法测量地磁场。选择扫场方式为三角波，使水平磁场、扫场磁场方向与地磁场水平分量方向相同。调节射频场频率至磁共振信号波形等间距。记下此时射频场频率 ν_1 。此时：

$$h\nu_1 = g_F \mu_B (B_0 + B_{\Delta} - B_{\parallel}) \quad (5)$$

置水平磁场、扫场磁场方向与地磁场方向相反。调节射频场频率至磁共振信号波形等间距。记录此时射频场频率 ν_2 。判断合磁场的方向是与地磁场水平分量方向相同还是相反，有：

$$h\nu_2 = g_F \mu_B (B_0 + B_{\Delta} + B_{\parallel}) \quad (6)$$

由以上两式，可得：

$$B_{\parallel} = \frac{(\nu_1 - \nu_2)}{(2g_F \mu_B)} \quad (7)$$

3.2.3 峰-谷扫频法

方法同等间距扫频法，调节射频场频率使得三角波形的波峰对齐光拍信号的波谷，以此为标准（如图1）。

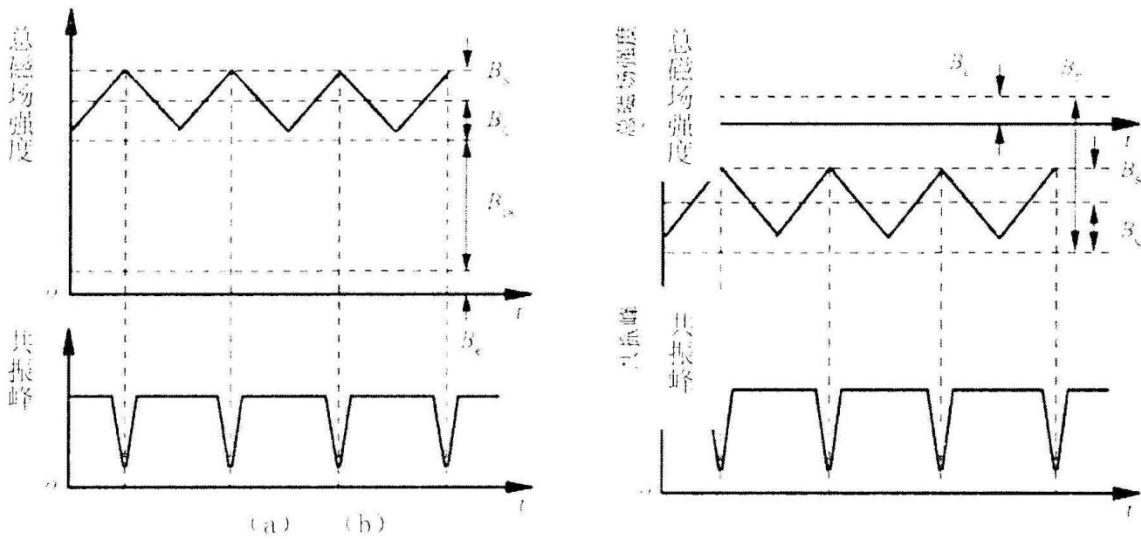


图1 峰-谷扫频法测量总磁场变化及其共振吸收峰
 (a) 水平直流磁场、三角波扫场和地磁场水平分量同向；
 (b) 水平直流磁场、三角波扫场和地磁场水平分量反向。

3.3 地磁场的合成

利用勾股定理，最后合成地磁场强度：

$$B = \sqrt{B_{\perp}^2 + B_{\parallel}^2} \quad (8)$$

4. 广州市地磁场强度的测量结果

采用上述方法测量广州市地磁场的水平分量和垂直分量得：

$$\text{广州市地磁场垂直分量} : B_{\perp} = 4.496 \times \frac{N_V}{rR} \times 10^{-7} (T) = 1.32 \times 10^{-5} T \quad (9)$$

测量 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 朗德因子 g_F 值为：

$$^{85}\text{Rb}: g_F = 0.3 \quad (10)$$

$$^{87}\text{Rb}: g_F = 0.5 \quad (11)$$

采用等间距扫频法测得地磁场水平分量的值为：

$$^{85}\text{Rb}: B_{\parallel} = 1.53 \times 10^{-5} T \quad (12)$$

$$^{87}\text{Rb}: B_{\parallel} = 1.71 \times 10^{-5} T \quad (13)$$

采用峰-谷扫频法测得地磁场水平分量的值为：

$$^{85}\text{Rb}: B_{\parallel} = 1.34 \times 10^{-5} T \quad (14)$$

$$^{87}\text{Rb}: B_{\parallel} = 1.60 \times 10^{-5} T \quad (15)$$

我国幅员辽阔，从南到北，地磁场的水平分量从 $4.0 \times 10^{-5} T$ 减小到 $2.1 \times 10^{-5} T$ (方向为北偏东)，而地磁场的垂直分量从 $-1.0 \times 10^{-5} T$ 增大到 $5.6 \times 10^{-5} T$ (垂直地表向下为正方向)。

广州市 B_{\perp} 理论值为 $2.612 \times 10^{-5} T \pm 1.65 \times 10^{-7} T$ ，将实验值与理论值相比，得百分偏差

$$E_0 = \frac{|x - x_{理}|}{x_{理}} \times 100\% = 49.5\% \quad (16)$$

中国地磁场的垂直分量从 $-1.0 \times 10^{-5} T$ 增大到 $5.6 \times 10^{-5} T$ (垂直地表向下为正方向)，且由于时间变化，地磁场也会发生改变，故在误差允许范围内，可认为该实验结果能够符合实际情况。

广州市 B_{\parallel} 理论值为 $3.75 \times 10^{-5} T \pm 1.33 \times 10^{-7} T$ ，将实验值与理论值相比，得利用 ^{87}Rb 进行的等间距测量的百分偏差最小，取偏差最小值作为测量结果，得：

$$E_0 = \frac{|x - x_{理}|}{x_{理}} \times 100\% = 54.4\% \quad (17)$$

中国地磁场的水平分量从 $2.1 \times 10^{-5} T$ 增大到 $4.0 \times 10^{-5} T$ ，为弱磁场，且由于时间变化，地磁场也会发生改变，故在误差允许范围内，可认为该实验结果能够符合实际情况。

合成广州市地磁场强度：

$$B = \sqrt{B_{\perp}^2 + B_{\parallel}^2} = 2.16 \times 10^{-5} T \quad (18)$$

已知广州市 B 理论值为 $4.57 \times 10^{-5} T \pm 1.52 \times 10^{-7} T$ ，将实验值与理论值相比，得百分偏差为

$$E_0 = \frac{|x - x_{理}|}{x_{理}} \times 100\% = 52.7\% \quad (19)$$

地磁场是弱磁场，经比对，实验值与理论值处于同一量级，故可认为测得的实验结果与实际值相吻合，结果较准确，用光磁共振测地磁场是可行的。

5. 结论与分析

利用光泵磁测量广州地磁场为 $2.16 \times 10^{-5} T$ ，与理论值 $4.57 \times 10^{-5} T \pm 1.52 \times 10^{-7} T$ 处于同一量级上，误差为52.7%。可认为测得的实验结果与实际值相吻合，结果较准确，用光磁共振测地磁场是可行的。

由于实验仪器本身存在的不足以及操作过程中的采用的测量标准等因素，采用不同方案测量的结果中都不可避免地存在一定误差，且不同方法测量结果的差别程度也不相同。综合分析可知其中共同的误差来源包括：

1. 随着实验过程的推进，实验仪器温度升高，热效应明显，导致仪器性能的变化。尤其是函数信号发生器，在实验过程中随着时间的累积、温度变化，信号发生器示数的稳定性明显变差，即使在同一次测量中示数也出现不稳定的波动现象。
2. 示波器上图像稳定程度和清晰程度低，直接影响测量数据的精确程度。
3. 实验室所用仪器老化，部分功能不稳定，例如池温偶尔发生故障。同时环境温度的变化对磁共振仪磁场有较大影响。同时由于仪器老化，水平线圈等所产生的磁场也会发生改变。
4. 实验室为核磁共振实验室，存在各种磁场，因而实验室跟理论值本身会有一定的偏差。所得的地磁场。

6. 小结

根据光磁共振的基本原理和实验方法，利用现有的光磁共振实验设备，设计了测量地磁场水平分量和垂直分量的实验，并采用了等间距扫频法和峰-谷扫频法两种方法测量地磁场水平分量，实测了广州地磁场强度。

实验结果表明，利用 ^{87}Rb 进行的等间距测量地磁场水平分量的百分偏差最小。实验测量值与实际值较为符合，说明本实验方法正确，实验结果可信，利用光磁共振确实可以实现地磁场的测量。同时还存在一定误差，要进一步精确地测量地磁场需要对实验方案进行改进。

参考文献：

[1] 吴先球, 熊予颖, 黄佐华, 燕安, 王福合, 徐伟. 近代物理实验教程 (第二版). 科学出版社, 2015. 12

[2] 张玉, 方立铭. 光磁共振测量芜湖地区的地磁场. 邵阳学院学报, 2012 年 12 月第 9 卷第 4 期.

[3] 吴奕初, 胡占成, 刘海林, 李美亚. 光磁共振实验测量地磁场方法的探究. 物理实验, 2016 年 4 月第 36 卷第 4 期.

[4] 张勇, 李绝, 李盛慧, 张沙, 腾妍, 李国庆. 利用光磁共振实验测量地磁场强度. 西南师范大学学报, 2011 年 8 月第 36 卷第 4 期.

[5] 张圆圆, 严雯. 光磁共振测量地磁场水平分量方法评述与改进. 物理实验, 2010 年 10 月第 30 卷第 10 期.

[6] 郎淑红, 宋庆功. 光磁共振测量地磁场的改进方法. 中国民航学院学报, 2002 年 8 月第 20 卷第四期.

[7] NCEI Geomagnetic Calculator <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#grf6mm>

附录一：实验原始数据与计算

1.

亥姆霍兹线圈参数		
	水平线圈	垂直线圈
线圈匝数 N	250	100
有效半径 r	0.2396m	0.1530m

2. 地磁场垂直分量 B_{\perp} 的测量数据记录

垂直场线圈匝数 N 为 100, 有效半径 r 为 0.1530m, 垂直场电流: 0.045A

$$B_{\perp} = 4.496 \times \frac{NV}{rR} \times 10^{-7} (T) = 1.32 \times 10^{-5} T$$

B_{\perp} 理论值为 $2.612 \times 10^{-5} T \pm 1.65 \times 10^{-7} T$

$$E_0 = \frac{|x - x_{理}|}{x_{理}} \times 100\% = 49.5\%$$

3. 测朗德因子 g_F

		^{85}Rb	^{87}Rb
水平线圈匝数		250	
有效半径		0.2396m	
水平场大小		0.221A	0.330A
频率	ν_1	749.89kHz	749.89kHz
	ν_2	684.48kHz	702.61kHz
	$(\nu_1 + \nu_2) / 2$	717.69kHz	726.25
共振磁场 B_0		$1.0367 \times 10^{-4} T$	$1.5481 \times 10^{-4} T$
g_F		0.5	0.3

普朗克常量: $h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$

玻尔磁子: $\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} J \cdot T^{-1}$

4. 地磁场垂直分量 B_{\perp} 的测量数据记录

(1) 等间距扫频法

85Rb: $\nu_1=700.70\text{kHz}$, $\nu_2=572.80\text{kHz}$,
 得: $B_{\parallel} = 1.53 \times 10^{-5}T$

87Rb: $\nu_1=700.70\text{kHz}$, $\nu_2=469.22\text{kHz}$,
 得: $B_{\parallel} = 1.71 \times 10^{-5}T$

(2) 峰-谷扫描法

85Rb: $\nu_1=701.75\text{kHz}$, $\nu_2=589.75\text{kHz}$,
 得: $B_{\parallel} = 1.34 \times 10^{-5}T$

87Rb: $\nu_1=700.35\text{kHz}$, $\nu_2=476.79\text{kHz}$,
 得: $B_{\parallel} = 1.60 \times 10^{-5}T$

广州市地磁场强度大小

$$B = \sqrt{B_{\perp}^2 + B_{\parallel}^2} = 2.16 \times 10^{-5}T$$

已知广州市 B 理论值为 $4.57 \times 10^{-5}T \pm 1.52 \times 10^{-7}T$, 将实验值与理论值相比, 得百分偏差为

$$E_0 = \frac{|x - x_{\text{理}}|}{x_{\text{理}}} \times 100\% = 52.7\%$$

附录二:

美国数据库所提供的地磁场

NCEIGeomagneticCalculators<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>

Magnetic Field Estimated Values

Magnetic field is calculated using the most recent IGRF model (IGRF12) of the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model. For 1900 to 1905 the calculator is based on the pu10f model. A smooth transition from pu10f to IGRF12 was made: from 1900 to 1905 the calculator uses an 80% weight for pu10f results and 20% weight for IGRF12 results. For more information, click the information button above.

Calculate Magnetic Field

Latitude: S • N

Longitude: W • E

Lookup Latitude / Longitude

Enter or paste a geographic location, city, or address to lookup coordinates at Earth Explorer

Date	Declination (+ E - W)	Inclination (+ D - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N - S)	East Comp (+ E - W)	Vertical Comp (+ D - U)	Total Field
2017-06-13	-3° 49' 22"	34° 51' 16"	37,507.1 nT	37,481.6 nT	-1,947.2 nT	26,131.1 nT	45,706.7 nT
Change/year	-0° 3' 41"/yr	0° 8' 27"/yr	-22.3 nT/yr	-24.2 nT/yr	-39.0 nT/yr	121.5 nT/yr	51.2 nT/yr
Uncertainty	0° 17"	0° 13"	183 nT	138 nT	19 nT	169 nT	152 nT

Result format: IGRF12 IGRF10 CS17

附录三: 个人感想

1. 实验前期针对此实验项目进行了充分的资料查阅与方案设计的详细考虑，使得在实验过程中能够快速有效地达到实验目的。实验过程中遇到出现问题也能较快解决。与以前相比实验能力有显著提高。意识到前期准备和资料文献查阅的重要性。
2. 通过这次实验，能力有较大的提高，能够熟练地掌握光磁共振实验仪器的操作，培养了动手能力，同时也通过综设实验，将理论联系实际，应用相关知识来解决生活中问题，培养在实践中研究问题，分析问题和解决问题的能力。
3. 小组合作讨论的形式大大提高了解决问题的能力，体现了合作的重要性。