

双臂电桥测量低电阻

用惠斯顿电桥测量中等电阻时，忽略了导线电阻和接触电阻的影响，但在测量 $1\ \Omega$ 以下的低电阻时，各引线的电阻和端点的接触电阻相对被测电阻来说不可忽略，一般情况下，附加电阻约为 $10^{-5}\sim 10^{-2}\ \Omega$ 。为避免附加电阻的影响，本实验引入了四端引线法，组成了双臂电桥（又称为开尔文电桥），是一种常用的测量低电阻的方法，已广泛的应用于科技测量中。

一、实验目的

- 1、了解四端引线法的意义及双臂电桥的结构；
- 2、学习使用双臂电桥测量低电阻；
- 3、学习测量导体的电阻率。

二、实验原理

1、四端引线法

测量中等阻值的电阻，伏安法是比较容易的方法，惠斯顿电桥法是一种精密的测量方法，但在测量低电阻时都发生了困难。这是因为引线本身的电阻和引线端点接触电阻的存在。图 1 为伏安法测电阻的线路图，待测电阻 R_X 两侧的接触电阻和导线电阻以等效电阻 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 表示，通常电压表内阻较大， r_1 和 r_4 对测量的影响不大，而 r_2 和 r_3 与 R_X 串联在一起，被测电阻（ $r_2+R_X+r_3$ ），若 r_2 和 r_3 数值与 R_X 为同一数量级，或超过 R_X ，显然不能用此电路来测量 R_X 。

若在测量电路的设计上改为如图 2 所示的电路，将待测低电阻 R_X 两侧的接点分为两个电流接点 C-C 和两个电压接点 P-P，C-C 在 P-P 的外侧。显然电压表测量的是 P-P 之间一段低电阻两端的电压，消除了 r_2 和 r_3 对 R_X 测量的影响。这种测量低电阻或低电阻两端电压的方法叫做四端引线法，广泛应用于各种测量领域中。例如为了研究高温超导体在发生正常超导转变时的零电阻现象和迈斯纳效应，必须测定临界温度 T_C ，正是用通常的四端引线法，通过测量超导样品电阻 R 随温度 T 的变化而确定的。低值标准电阻正是为了减小接触电阻和接线电阻而设有四个端钮。

2、双臂电桥测量低电阻

用惠斯顿电桥测量电阻，测出的 R_X 值中，实际上含有接线电阻和接触电阻（统称为 R_j ）的成分（一般为 $10^{-3}\sim 10^{-4}\ \Omega$ 数量级），通常可以不考虑 R_j 的影响，而当被测电阻达到较小值（如几十欧姆以下）时， R_j 所占的比重就明显了。

因此，需要从测量电路的设计上来考虑。双臂电桥正是把四端引线法和电桥的平衡比较法结合起来精密测量低电阻的一种电桥。

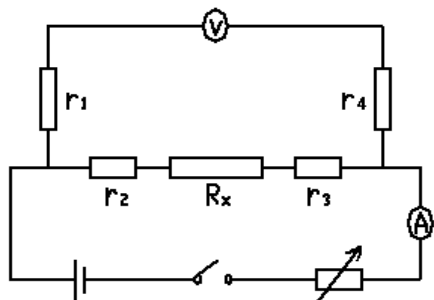


图 1 伏安法测电阻

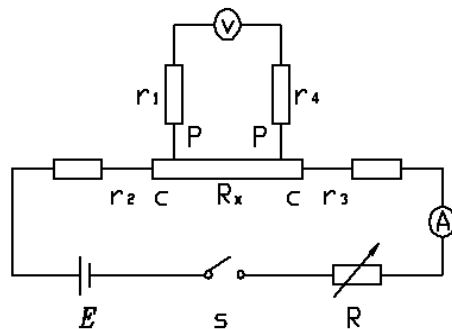


图 2 四端引线法测电阻

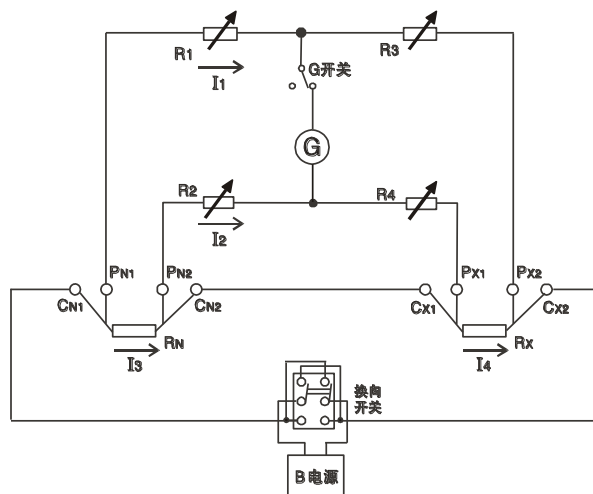


图 3 双臂电桥测低电阻

如图 3 中， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为桥臂电阻。 R_N 为比较用的已知标准电阻， R_x 为被测电阻。 R_N 和 R_x 是采用四端引线的接线法，电流接点为 C_1 、 C_2 ，位于外侧；电位接点是 P_1 、 P_2 位于内侧。

测量时，接上被测电阻 R_x ，然后调节各桥臂电阻值，使检流计指示逐步为零，则 $I_G=0$ ，这时 $I_3=I_4$ 时，根据基尔霍夫定律可写出以下三个回路方程。

$$I_1 R_1 = I_3 \cdot R_N + I_2 R_2$$

$$I_1 R_3 = I_3 \cdot R_x + I_2 R_4$$

$$(I_3 - I_2)r = I_2(R_2 + R_4)$$

式中 r 为 C_{N2} 和 C_{X1} 之间的线电阻。将上述三个方程联立求解，可得下式：

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} R_N + \frac{r R_2}{R_3 + R_2 + r} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2} \right)$$

由此可见，用双臂电桥测电阻， R_x 的结果由等式右边的两项来决定，其中

第一项与单臂电桥相同，第二项称为更正项。为了方便测量和计算，使双臂电桥求 R_x 的公式与单臂电桥相同，所以实验中可设法使更正项尽可能做到为零。在双臂电桥测量时，通常可采用同步调节法，令 $R_3/R_1=R_4/R_2$ ，使得更正项能接近零。在实际的使用中，通常使 $R_1=R_2$ ， $R_3=R_4$ ，则上式变为

$$R_x = \frac{R}{R_1} R_s$$

在这里必须指出，在实际的双臂电桥中，很难做到 R_3/R_1 与 R_4/R_2 完全相等，所以 R_x 和 R_N 电流接点间的导线应使用较粗的、导电性良好的导线，以使 r 值尽可能小，这样，即使 R_3/R_1 与 R_4/R_2 两项不严格相等，但由于 r 值很小，更正项仍能趋近于零。

为了更好的验证这个结论，可以人为地改变 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 的值，使 $R_1 \neq R_2$ ， $R_3 \neq R_4$ ，并与 $R_1=R_2$ ， $R_3=R_4$ 时的测量结果相比较。

双臂电桥所以能测量低电阻，总结为以下关键两点：

a、单臂电桥测量小电阻之所以误差大，是因为用单臂电桥测出的值，包含有桥臂间的引线电阻和接触电阻，当接触电阻与 R_x 相比不能忽略时，测量结果就会有很大的误差。而双臂电桥电位接点的接线电阻与接触电阻位于 R_1 、 R_3 和 R_2 、 R_4 的支路中，实验中设法令 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 都不小于 100Ω ，那么接触电阻的影响就可以略去不计。

b、双臂电桥电流接点的接线电阻与接触电阻，一端包含在电阻 r 里面，而 r 是存在于更正项中，对电桥平衡不发生影响；另一端则包含在电源电路中，对测量结果也不会产生影响。当满足 $R_3/R_1=R_4/R_2$ 条件时，基本上消除了 r 的影响。

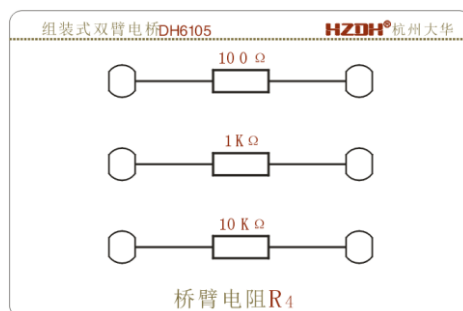
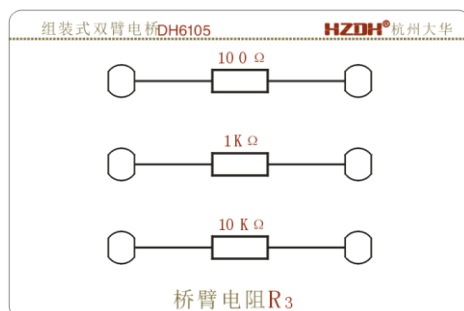
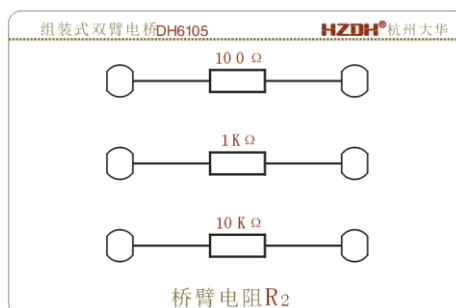
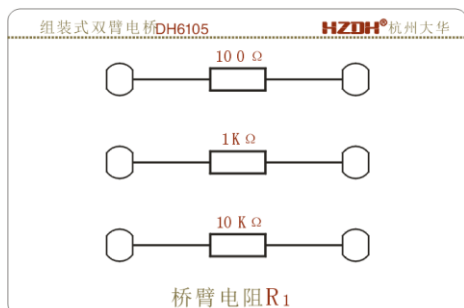
三、实验仪器

DH6105 型组装式双臂电桥，检流计，被测电阻，换向开关，通断开关，导线等。

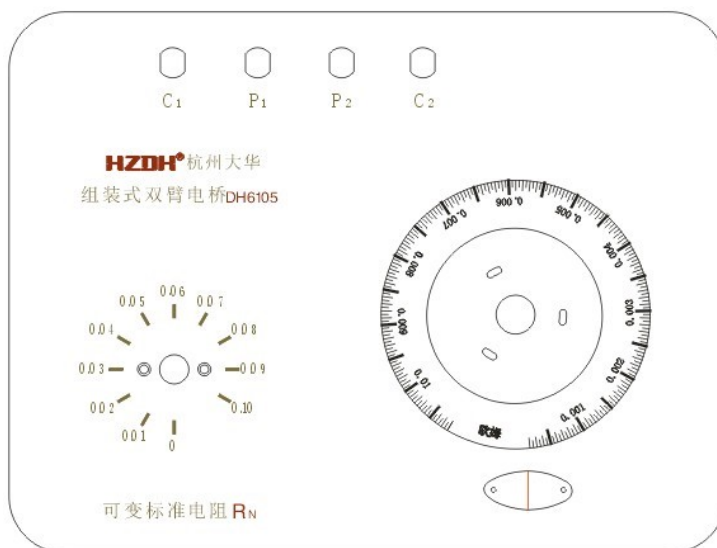


四、实验仪器的技术参数

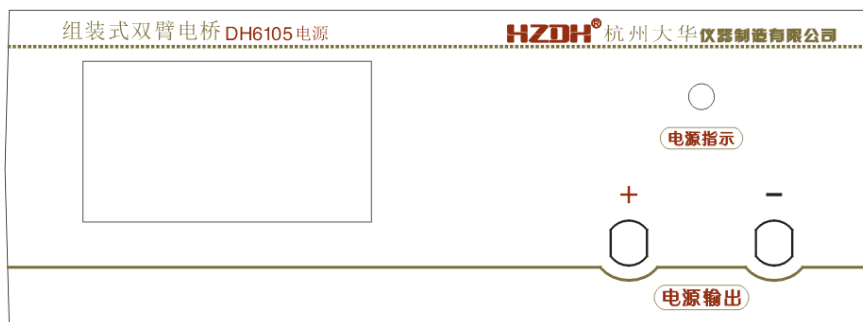
1、桥臂电阻： R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，阻值 $100\ \Omega$ 、 $1\text{K}\ \Omega$ 、 $10\text{K}\ \Omega$ ，精度：0.02%。



2、可变标准电阻： R_N 有 C_1 、 P_1 、 P_2 、 C_2 四个引出端 (C_1 、 C_2 为电流端； P_1 、 P_2 为电位端；其中 C_1 与 P_1 相连， C_2 与 P_2 相连)，由 $10 \times 0.01 + 10 \times 0.001\ \Omega$ 组成。其中 $10 \times 0.001\ \Omega$ 是一个 100 分度的划线盘，分辨率为 $0.0001\ \Omega$ ，精度 5%。



3、组装式双臂电桥 DH6105 电源：1.5V 输出，随负载阻抗的变化而不同，最大电流 1.5A，由指针式 2A 电流表指示输出电流大小。



4、电流换向开关 DHK-1，具有正向接通、反向接通、断三档功能；面板上 1 脚和 2 脚为输入，分别接 DH6105 电源输出的正负端，3 脚和 4 脚为输出；当开关打向正接时，1 和 3 接通，2 和 4 接通，即 3 脚为正输出，4 脚为负输出；当开关打向反接时，1 和 4 接通，2 和 3 接通，即 3 脚为负输出，4 脚为正输出；当开关打向断时，3 和 4 端无电压输出。



5、检流计开关，用于控制检流计的通和断；按下开关为通，开关弹起为断。



6、AZ19 检流计，用于指示电桥是否平衡，灵敏度可调。在测量 0.01~11 Ω 范围内，在规定的电压下，当被测量电阻变化允许一个极限误差时，指零仪的偏转大于等于一个分格，就能满足测量准确度的要求。灵敏度不要过高，否则不易平衡，测量电阻时间过长。AZ19 检流计的使用说明书详见附件。

7、被测电阻 DHSR，四端接法，配有不同的金属试材，并带有长度指示，可用于测量金属的电阻率。C₁, C₂ 为电流端；P₁, P₂ 为电位端。C₁, P₁, P₂, C₂ 接线柱内部分别与样品上 4 个固定螺钉相连，其中连接 C₁, C₂, P₁ 的螺钉固定不动，连接 P₂ 的固定螺钉可以在试材上滑动，样品的实测长度即为中间两个固定

螺钉 P_1 和 P_2 之间的距离。注意：在测试时候，固定螺钉一定要锁紧，减小接触电阻。



8、总有效量程：0.0001~11 Ω ，量程可以自由设置。典型的整数倍的有效量程于下表所示：

量程因素	有效量程 (Ω)	测量精度 (%)
X100	1~11	0.2
X10	0.1~1.1	0.2
X1	0.01~0.11	0.5
X0.1	0.001~0.011	1
X0.01	0.0001~0.0011	5

五、实验内容 1

1、如图 3 所示接线。将可调标准电阻、被测电阻，按四端连接法，与 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 连接，注意 C_{N2} 、 C_{X1} 之间要用粗短连线。

2、打开专用电源和检流计的电源开关，加电后，等待 5min，调节指零仪指针指在零位上。在测量未知电阻时，为保护指零仪指针不被打坏，指零仪的灵敏度调节旋钮应放在最低位置或非线性档，使电桥初步平衡后再增加指零仪灵敏度。在改变指零仪灵敏度或环境等因素变化时，有时会引起指零仪指针偏离零位，在测量之前，随时都应调节指零仪指零。

3、估计被测电阻值大小，选择适当 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的阻值，注意 $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_4$ 的条件。先按下“G”开关按钮，再正向接通 DHK-1 开关，接通电桥的电源 B，调节步进盘和划线读数盘，使指零仪指针指在零位上，电桥平衡。注意：测量低阻时，工作电流较大，由于存在热效应，会引起被测电阻的变化，所以电源开关不应长时直接通，应该间歇使用。记录 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_N 的阻值。

$$R_{X1} = R_3 / R_1 \times R_N \text{ (步进盘读数+滑线盘读数)}$$

4、如要更高的测量精度，保持测量线路不变，再反向接通 DHK-1 开关，重新微调划线读数盘，使指零仪指针重新指在零位上，电桥平衡。这样做的目的

是消减小接触电势和热电势对测量的影响。记录 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_N 的阻值。

$$R_{X2} = R_3/R_1 \times R_N \text{ (步进盘读数+滑线盘读数)}$$

被测电阻按下式计算：

$$R_X = (R_{X1} + R_{X2}) / 2$$

5*、保持以上测量线路不变，调节 R_2 或 R_4 ，使 $R_1 \neq R_2$ 或 $R_3 \neq R_4$ ，测量 R_X 值，并与 $R_1=R_2$ ， $R_3=R_4$ 时的测量结果相比较。

六、实验内容 2

1、测量一段金属丝的电阻 R_x

按图 3 连接好电路。调定 $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_4$ ，正向接通工作电源 B，按下“G”按钮进行粗调，调节 R_N 电阻，使检流计指示为零，双臂电桥调节平衡，记下 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_N 的阻值。

反向接通工作电源 B，使电路中电流反向，重新调节电桥平衡，记下 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_N 的阻值。

2、记录金属丝的长度 L。

3、用螺旋测微计测量金属丝的直径 d，在不同部位测量五次，求平均值，根据公式 $\rho = \pi d^2 R_x / 4L$ ，计算金属丝的电阻率。

4、改变金属丝的长度，重复上述步骤，并比较两次测量结果。

七、注意事项和维修保养

1、在测量带有电感电路的直流电阻时，应先接通电源 B，再按下“G”按钮，断开时，应先断开“G”按钮，后断开电源 B，以免反冲电势损坏指零电路。

2、在测量 0.1Ω 以下阻值时， C_1 、 P_1 、 C_2 、 P_2 接线柱到被测量电阻之间的连接导线电阻为 $0.005 \sim 0.01\Omega$ ，测量其它阻值时，联接导线电阻应小于 0.05Ω 。

3、使用完毕后，应断开电源 B，松开“G”按钮。关断交流电。如长期不用，应拔出电源线确保用电安全。

4、仪器长期搁置不用，在接触处可能产生氧化，造成接触不良，使用前应该来回转动 R_N 开关数次。

八、思考题

1、双臂电桥与惠斯通电桥有哪些异同？

2、双臂电桥怎样消除附加电阻的影响？

3、如果待测电阻的两个电压端引线电阻较大，对测量结果有无影响？

4、如何提高测量金属丝电阻率的准确度？

附 1：AZ19 型直流检流计

一、概述

AZ19 型直流检流计是由高增益、低漂移、低噪声放大器配以大表面的指针式表头而构成的新型直流检流计。可以用作高精度的直流电桥、精密电位差计的外接检流计，也可作低噪声低漂移直流放大器、或直接作直流电压表使用。市电供电的检流计供实验室使用，干电池供电的可供实验室和室外现场使用。

仪器主要特点有：

- 1、由于本检流计具有灵敏度高，不需外配临界电阻，过载能力强，阻尼时间短，抗震性好等特点，可以直接替代 AC15/1~AC15/6 等光电复射式检流计，能较好地适应高精度直流电桥、精密电位差计等的使用。
- 2、本检流计设有非线性档，压缩动态约 10dB，适合指零使用的粗调。
- 3、仪器采用双层屏蔽，信号地悬浮，具有较高的抗干扰能力。

二、主要技术指标

1、使用条件

- (1) 环境温度：0℃~40℃
- (2) 环境湿度：≤80%RH
- (3) 避免阳光直晒，空气中无腐蚀性气体，避免严重振动。

2、电源

- (1) 干电池供电型式：1~3 节 6F22 型 9V 层迭电池，并联使用。
- (2) 市电供电型式：220V/50Hz 交流电，耗电≤3W。

3、仪器基本参数如下表：

量 程	电压常数	电流常数	输入阻抗	响应时间
非线性 （“0”附近）	50μV/格	5×10 ⁻⁹ A/格	10.2KΩ	<2 秒
±30μV	0.5μV/格	5×10 ⁻¹¹ A/格		
±100μV	2μV/格	2×10 ⁻¹⁰ A/格		
±300μV	5μV/格	5×10 ⁻¹⁰ A/格		
±1mV	20μV/格	2×10 ⁻⁹ A/格		
±3mV	50μV/格	5×10 ⁻⁹ A/格		
±10mV	200μV/格	2×10 ⁻⁸ A/格		

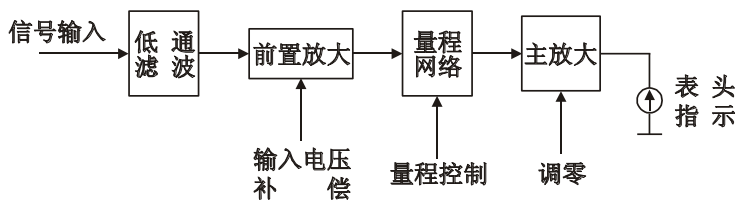
4、电压噪声：≤±0.25μV_{P-P}

- 5、零电压漂移： $\leq 2.5\mu\text{V}/4$ 小时
- 6、电压指示误差： $\leq \pm 5\%$
- 7、对市电串联干扰抑制比：大于 60dB；
对市电共模干扰抑制比：大于 80dB
- 8、温度系数： $\leq 0.5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- 9、外形尺寸：170×160×230
- 10、重量：约 2Kg

三、基本工作原理

本检流计电路原理框图如下图所示：

直流信号接入输入端，经低通滤波加入到低噪声低漂移放大电路进行前置放大。为了补偿输入信号偏移和运算放大器的输入失调电压，本检流计设置了输入电压补偿电路。量程控制使输入信号归一化。在主放大电路输出端设置了调零电路，输出调零主要用于克服主放大电路失调电压的影响。应用宽表面表头不但提高了指针分辨力，也增加了检零仪美观程度。



四、使用方法

1、使用前准备

干电池供电型式的检流计，第一次使用前，要求打开后板上的电池盖，装入 1~3 节 6F22 型 9V 电池，上好电池盖，调节前面板上的量程开关，从“关机”旋至“调零”档，干电池向检流计供电。市电供电型式的检流计，由电源线接入 220V/50Hz 电源上，打开后盖板上电源开关，面板上“电源指示”灯亮，检流计即可进入使用前的“调零”准备工作。

检流计加电后，检流计输入端短路，量程开关置“调零”档，调节“调零”装置，使表头指针指向“0”。开关置“补偿”档，调节“补偿”装置，使表头指针指向“0”，反复调节“调零”和“补偿”，表头指针都指向“0”位，说明调零工作已经完成，已经作好了检流计工作前的准备工作。

2、作直流电桥或电位差计指零用

将直流电桥或电位差计的“检流计”端和本检流计输入端子用导线连接起来，检流计开关置“非线性”档，调节电桥或电位差计，达到粗平衡，然后选择合适的量程，用于电桥或电位差计的精细指零。高精度电桥或精密电位差计指零时，一般建议选择 $\pm 100\mu\text{V}$ 档，用户可根据使用经验自行选择合适的量程。

如果电桥或电位差计尚未加电，而检流计指针已出现小许偏移，这时量程为 $\pm 30\mu\text{V}$ 或 $\pm 100\mu\text{V}$ 档，可以稍稍调节“补偿”装置，使指针指“0”，量程为

大量程时，可稍稍调节“调零”装置，使指针指“0”。这种现象的出现，往往是由于存在一定的接触电势或热电势，稍稍调节“补偿”和“调节”，补偿了接触电势和热电势的影响，对平衡指零影响不大。

3、作直流电压表使用

作直流电压表使用时，可根据量程档，直接从表头指针位置读数。

4、“接地”端

检流计面板上设有“接地”端子，该端子和指零仪屏蔽外壳相连。如果干扰严重时，可将该端子用导线连到电桥或电位差计的屏蔽端子上。有条件时，可一起接入大地。

五、维护和保养

1、仪器工作环境应符合使用条件要求。

2、每次使用完毕后，干电池供电型式检流计，量程开关一定打至“关机”位置，以切断干电池电源。长期不用时，应将干电池取出，以免漏电腐蚀检流计。

市电供电型式检流计，一定要关断后板上交流电源开关，量程开关打至“表头保护”档。长期不用时，应拔出电源线，以免引发不测之事故。

