关于试电笔相关认识疑难的探讨

王 宏 蒋炜波 (清华大学附属中学 北京 100084)

摘 要 试电笔是一种家庭电路检测工具,也是初中阶段学生比较难以理解的物理仪器。文章针对教学中教师和学生对试电笔的一些理解认识误区进行分析探讨,以期为教学提供借鉴。

关键词 试电笔 物理 探讨
文章编号 1002-0748(2024)3-0040 **中图分类号** G633·7 **文献标识码** B

试电笔可以用来检验家庭电路的火线和零线,以及判断家庭电路中的某位置是否有高电压。使用时人需要站在地上接触试电笔的笔尾金属体,然后将试电笔的笔尖金属体与想检验的位置接触,若试电笔的氖管发光,则表明检验的位置与火线相连通,或者有较高的电压,存在危险。

教学中教师和学生都对试电笔的使用存在疑惑,对其工作原理机制的不确定导致教师对学生提出的很多问题都难以回答和解释,影响了教学的实际效果。鉴于此,有必要针对试电笔的认识疑难进行分析和探讨,本文以最简单的螺丝刀式试电笔为例进行讨论分析。

1 关于试电笔的氖管发光

螺丝刀式普通试电笔主要由金属笔尖、氖管、电阻、弹簧、笔尾金属体、绝缘塑料体等部件组成。



(a) (b)

图1

其中氖管内充有低压的氖气,两个平行金属片放置到管内,当金属片之间的电压增大到一定值时,氖原子电离氖管发光。关于试电笔氖管发光,有几个问题值得讨论。

1.1 辉光放电现象

气体放电的方式有很多,包括辉光放电、弧光放电等,具体放电方式与气压、电压有关,试电笔中氖气属于辉光放电。辉光放电时,在电压的作用下从阴极发出的自由电子与氖原子碰撞,使之激发至高能级从而引发由高能级到低能级的跃迁发出可见光,与此同时部分被碰撞的氖原子电离形成更多的阴阳离子从而维系导电过程持续辉光放电。

根据气体放电帕邢定律,在其他条件相同时,气体的击穿电压与气体压强 p 和电极距离 d 的乘积有关,变化趋势如图2所示,在某一特定的 pd 值时击穿电压达到最小值 U_{min}。最小击穿电压 U_{min} 还与气体种类、电极材料、电极粗糙程度等因素有关。辉光放电时气体的气压、电压和电流都较小,氖管中氖气的气压通常在 10^3 Pa 数量级,辉光放电的电流小于 10^{-4} A、电压约为 10^2 V 数量级。实验测量试电笔氖管发光时的电流约为 10^{-6} A 数量级,电压约为 10^2 V数量级,如图3所示,可见普通试电笔能检测电压通常不低于100 V。

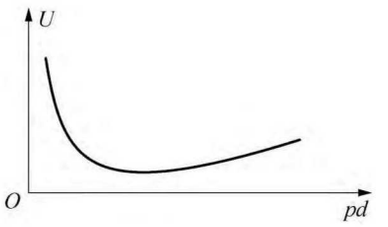
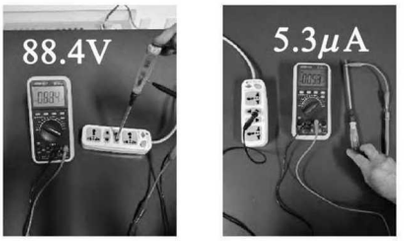


图2



(a) 氖管发光电压 (b) 氖管发光电流

图3

1.2 可以用空气替换氖气吗

事实上低压空气、氮气、氧气都容易实现辉光放

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电，它们的辉光颜色分别是玫瑰红、金红和浅黄。但空气、氮气、氧气化学性能较活泼，能和很多高导电性的金属（如银、铜、铝等）电极发生反应，会降低电极的使用寿命。如果更换为对它们显惰性的金、铂等电极材料，造价则又过于昂贵。不仅如此，放电条件下氧气可以和氮气反应，甚至氧气自己还会与自己反应产生臭氧。鉴于此，生产中不会使用空气、氮气、氧气等气体制作试电笔的发光管。

1.3　可以用二极管替换氖管吗



图4　二极管发光电流

发光二极管的单向导通性使得单一的二极管只能通过直流电，若并联反向安装两个二极管，则能够实现通过交流电。发光二极管发光时两端的电压通常在1 V～4 V内，电压值远低于氖管，具体数值与二极管的发光颜色有关。但是，试电笔在使用的时候需要利用人体将试电笔连入电路，氖管工作时的电流仅约10^{-6} A，发光二极管工作时电流一般在10^{-3}～10^{-2} A数量级，如图4所示，由于通过人体的电流达到8 mA以上时会存在一定的危险，因此家庭电路中用发光二极管直接替换试电笔氖管并不很安全。

2　关于试电笔的工作过程

2.1　人能否离开地面

如果人体离开地面，或人站在绝缘木板凳上使用试电笔，能完成交变电压的检测吗？用试电笔进行实验发现，人站在绝缘木板凳上可以完成电压检测，甚至人跳离地面时试电笔的氖管仍然能发光。可见，与地面直接导通不是试电笔使用的必要条件。

日常穿的鞋都有很好的绝缘性，直接站在地面上使用试电笔时，人体与大地之间也不是导通的。如果用一根金属导线直接将试电笔的笔尾金属体与地面相连接，检测家中火线时发现试电笔的氖管发光；再将金属导线与地面分离使导线和地面的电容极小，会发现试电笔氖管不发光；再利用一个横截面较大的金属板替换人体接入试电笔所在电路，即使金属板与地面分离较远，试电笔也能够发光，如图5所示。可见，试电笔使用时人体和地面虽没有直接导通，但因为已经构成了一个电容器，电容器“通交流隔直流”的特点，使得微弱的交变电流能够形成。



（a）试电笔笔尾接通地面　（b）试电笔笔尾离开地面　（c）笔尾接金属板离开地面

图5

检测直流电压时人体需要与地面保持导通，检测交变电压时不论笔尾与地面导通与否都能完成检验。实验测得人站在地面上与地面组成的电容器电容约为20 pF，如图6所示，只要人体离开地面的距离不太大，人与地面的电容便不至于过小，容抗便不会过大，试电笔便能够完成交变电压的检测。



图6

2.2　人有无触电危险



图7

（1）人与地面导通

人体与地面不绝缘直接导通时，人与地面不形成电容器。不论是检测直流电压和交变电压，正常检测时都相当于将试电笔内大电阻、氖管电阻和人体电阻串联入了220 V电路中，实验测得大电阻约2.3×10^{6} Ω数量级，如图7所示，人体手脚之间电阻约10^{7} Ω数量级。氖管发光时的电阻计算值约10^{7}～10^{8} Ω数量级，因此电路电流仍然约10^{-6} A数量级，人体是安全的。

需要注意，人体电阻实际值很容易发生变化，比如左手右手间的电阻只有约10^{6} Ω数量级，在身体潮湿等情况下电阻会急剧减小到1×10^{4} Ω以下，因此如果被检测位置的电压过高，则会使得通过人体的电流可能较大从而引起触电危险，鉴于此，普通试电笔的检测电压通常都不高于500 V。

此时如果去掉试电笔中的大电阻，鉴于氖管电阻和人体电阻仍然非常大，实验表明此时试电笔仍能够继续使用。如果人与地面连通并直接接触试电笔的笔尖金属体，那么此时人体两端将存在220 V电压，通过人体的电流将可能达到20 mA以上，显然人会有触电危险。

（2）人与地面绝缘

人与地面绝缘时只有交变电流才能通过，因此试电笔只能检测交变电压，此时相当于将大电阻、氖管电阻、人体电阻、人与地面组成的电容器串联构成

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

了 RC 电路，RC 电路的总阻碍作用包括电阻和容抗两部分。

电容器的容抗阻碍作用为 $X_C=\frac{1}{2\pi fC}$，实验测得人与地面组成的电容器电容约 20 pF，在家庭用电 50 Hz 频率下，代入数据计算容抗结果约为 10^9 Ω 数量级，大于大电阻、氖管和人体的总阻碍作用（约 10^8 Ω 数量级）。但由于电容器上交变电压和定值电阻上的交变电压存在相位差，因此不能直接将 220 V 有效值的交变电压简单的按照阻抗大小进行比例分配。

家庭电路电压瞬时值为 $U=311\sin(100\pi t+\phi)$，为便于讨论取初相位 $\phi=0°$，即 $U=311\sin(100\pi t)$，人与地面电容取 20 pF，其余总电阻约 10^8 Ω，根据 RC 电路分析可以得到电阻两端的电压表达式为 $U_R=\frac{311\sin(100\pi t)}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{100\pi RC}\right)^2}}$，人与地面的电容两端的电压表达式为 $U_C=\frac{311\cos(100\pi t)}{\sqrt{1+(100\pi RC)^2}}$ [1]。代入相应数据计算可以得到总电阻两端电压最大值约为 160 V，人与地面电容间电压最大值约为 260 V，电路中最大电流约 10^{-6} A 数量级。

如果在使用中人不小心直接接触了金属笔尖，此时 RC 电路中总电阻只剩下人体的约 10^7 Ω，利用上述公式计算得到人体电阻分配到的电压最大值约为 20 V，电路最大电流仍约 10^{-6} A 数量级，仍然安全，这也与人站在绝缘体上接触火线不会触电相吻合。有意思的是，如果人体电阻下降到 10^4 Ω，计算得到人体电阻分配到的电压最大值仅为 0.02 V，交流电压几乎全部加在了人体与地面组成的电容上，此时利用电压与容抗相比计算电流仍仅约为 10^{-6} A 数量级。

可见，将试电笔的大电阻去掉并不影响整体的总电阻，试电笔仍可以继续使用，不会对人造成危害，如图 8 所示。人不小心碰上了金属笔尖，只要人与地面保持良好的绝缘，仍然是安全的。但是鉴于可能的使用场景差异，不可能保证使用者与地面之间总是绝缘的，因此从安全角度考虑，试电笔中必须安装阻值较大的大电阻，且使用时不允许接触金属笔尖。



图 8

3　关于试电笔检测对象

3.1　能否检测直流电压

试电笔能够检测直流电压，只要被检测电压能够让氖管发生辉光放电，然后保证试电笔的笔尾金属体与地面相接触即可。检验直流电压时，氖管中的两个电极中阴极是固定的，由于辉光放电只会在阴极附近发生，因此检验直流电压时会有 1 个电极发光。检验交变电压时，由于两极的电压高低不停地变化，且变化频率超出了肉眼的识别极限，因此会观察到在两级附近都出现辉光放电现象。利用试电笔检测手摇式静电感应起电机的一个放电叉，可以看到氖管闪亮发光，这说明试电笔的确能够检测直流电压。

需要说明的是，此时虽然人与地面绝缘不能通直流电，但是在人与地面组成的电容器的充电过程中有电流通过氖管，因此能够发生短时间的辉光放电现象，只是不能持续发光。

3.2　检测有效值还是瞬时值

试电笔中氖管的发光条件是氖管两端的电压瞬时值超过起辉电压，直流电压和交流电压均可，不涉及发热的相关问题，因此与电压的有效值没有关系。

这一点可以利用实验进行证实。在干燥的环境中用毛皮摩擦硬橡胶棒，然后正常使用试电笔是笔尖金属体与硬橡胶棒接触，会发现氖管中靠近硬橡胶棒的一端电极（阴极）发出瞬间的起辉放电。该现象时间很短且辉光亮度不明显，此外由于人与地面直接存在电容，氖管不能持续发光而是不断地闪烁，因此实验时在较黑暗的环境中更容易观察到。

3.3　能否检测强电流

不论是直流电流还是交变电流，都不是试电笔的检测对象。试电笔工作时检测点和地面之间需要存在较高的电压，直流电压或者交流电压均可，在这一电压的作用下氖管发光。存在较高的电压并不一定存在较大的电流，反之存在较大的电流也不一定存在较高的电压。

比如家庭电路中，闭合开关后台灯正常工作，此时灯泡两端火线和零线之间有 220 V 电压，也有电流通过台灯和导线。若正常使用试电笔检测台灯一端的火线，试电笔氖管发光；若正常使用试电笔检测台灯另一端的零线，虽然零线中也有电流，但是试电笔并不发光。这是因为试电笔检测零线时，零线和

（下转第 46 页）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间越长，电流产生的热量越多。苏科版教材在实验之后介绍焦耳定律的内容，以实现从定性到定量的递进。最后介绍焦耳定律，可发现电热与电阻、通电时间成正比，而与电流的平方成正比，和实验的定性结论是一致的。

4　解决一个实际的问题

只有将学到的知识应用到实际中，才能体现知识的价值。所以，本节课的最后可以设计一个自制器材类的实验。例如，利用如图3所示的器材（导线、电池、开关、电阻丝）自制一个简单的“封口机”，将塑料袋封口。这个实验具有一定的开放性，只提供器材，不告知具体操作步骤。不但进一步锻炼了学生的动手操作能力，在思维上也实现了从理解到应用的进阶，从而使整节课充分体现出从生活到物理，再从物理到社会的教学理念。

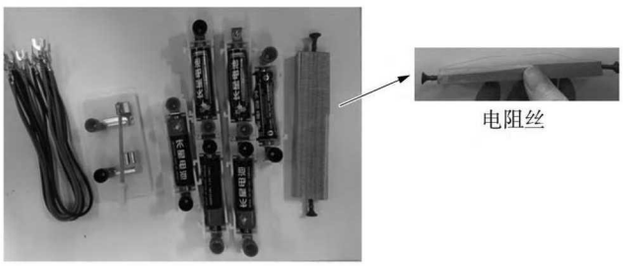


图3

综上，第3、4两部分内容的思维进阶路径如图4所示。

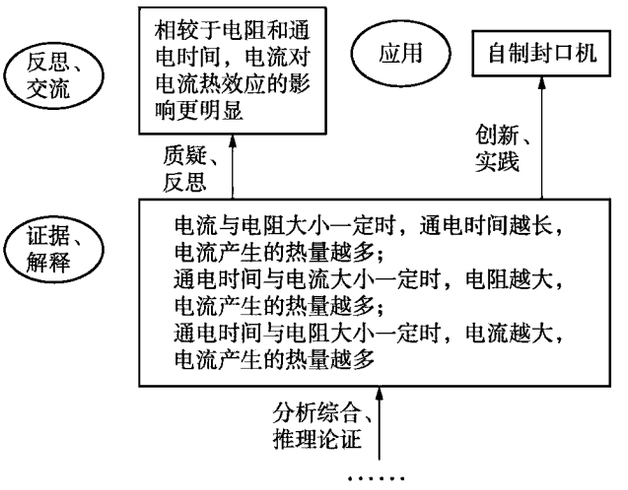


图4

促进思维进阶的实验教学，必定以“学为中心”为模式。教师搭建台阶，学生攀爬台阶。教师可以对教材内容进行一定程度的有效重构；可以从学情出发，设置教学环节、优化问题设计，帮助学生实现深度学习。

参考文献

[1] 中华人民共和国教育部. 义务教育物理课程标准（2022年版）[S]. 北京：北京师范大学出版社，2022：1—5.
[2] 叶兵. 初中物理实验情境化命题策略的实证研究——基于江苏省2018年义务教育质量监测的分析[J]. 物理教学，2019(7)：41—45.
[3] 刘炳昇，李容. 义务教育教科书物理九年级下册[M]. 南京：江苏凤凰科学技术出版社，2021：12—17.
[4] 杨勇诚. 刍议初中物理教学中的情境创设[J]. 物理教师，2022(1)：39—42.
[5] 蒋炜波，王宏. 物理实验的设计如何指向学生科学思维的培养[J]. 物理教学，2019(12)：10—12，9.

（上接第42页）

地面之间不存在电压，试电笔和人体相当于被短路，因此氖管不发光。

4　结束语

教学中对试电笔的处理一般比较浅显，尤其是基于初中学生的认知水平和能力而言，诸如电容器、辉光放电、*RC*电路等内容无法给学生解释清楚，但是教学中对于学生的一些疑问的回答处理必须谨慎，基于学情和认知的适当科学性妥协是可以的[2]，但是不能出现科学性错误，要关注学生的思维层级发展，要给学生将来的物理学习留下生长发展的根基[3]。

试电笔部分的教学不只是针对物理知识，更是对学生安全用电的教育，是良好的学生科学态度与责任素养的培养发展契机。教学中应该多围绕使用过程中的安全问题进行讨论，尤其是对一些可能导致触电危险的不当操作的思考分析和实验演示，联系实际去伪存真以培养学生的问题分析与解决能力，切实落实新课标“从生活走向物理、从物理走向社会”的学科理念。

参考文献

[1] 汪艳，夏雪琴. *RC*、*RL*及*RLC*串联电路幅频和相频特性的研究[J]. 大学物理实验，2012，25(5)：55—60.
[2] 蒋炜波. 初中物理教学如何做好科学性妥协[J]. 物理教学，2021，43(05)：39—43，34.
[3] 蒋炜波. 物理教学中科学思维发展层级模型的构建初探[J]. 物理教学，2021，43(10)：5—9.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net