

## 弗兰克-赫兹实验中常见问题分析及解决

鲍 华 王文清 汪亚萍

(西藏大学理学院, 西藏 拉萨 850000)

**摘 要** 弗兰克-赫兹实验是大学物理实验教学中的一个重要实验。该实验通过对于原子激发电位的观测,证明了原子内部能级的存在,为波尔理论提供了直接的证据。然而在实际实验过程中,由于环境、温度、以及设备本身影响,容易导致测量数据不理想,实验结果不清晰。在忽略外界因素影响下,对灯丝电压、控制电压、拒斥电压的设置不当,是实验数据不理想的常见原因。本文通过对实验中常见图像问题进行原因分析,解决了部分图像问题,并对不同电压参数设置进行处理,得出最佳参数设置一般与出厂参数存在10%左右的误差的结论。

**关键词** 弗兰克-赫兹实验;参数设置;误差分析;数据处理

## ANALYSIS AND SOLUTION OF COMMON PROBLEMS IN FRANK-HERTZ EXPERIMENT

BAO Hua WANG Wenqing WANG Yaping

(College of Science, Tibet University, Lhasa, Tibet 850000)

**Abstract** Frank-Hertz experiment is important in college physics experiment teaching. By observing the atomic excitation potential, the experiment proved the existence of atom's internal energy levels and provided direct evidence for Bohr's theory. However, in the actual experimental process, due to the influence of environment, temperature and equipment itself, it is easy to lead to unsatisfactory measurement data and unclear experimental results. Ignoring influences of external factors, the improper setting of filament voltage, control voltage and retarding voltage are the reason for the unreasonable experiment data. In this paper, by analyzing the causes of common image problems in the experiment, part of the image problems are solved. Then, taking into account all voltage parameters and modify some of them. It is concluded that there generally exists an error of 10% between the optimum parameter and the factory parameter.

**Key words** Franck-Hertz experiment; parameter setting; error analysis; data processing

弗兰克-赫兹实验作为大学物理教学中的基本实验,对于学生理解原子能级结构以及波尔理论具有重要意义。该实验通过示波器直观地观测到原子激发电位,证明了原子内部能级的存在,为波尔理论提供了直接证据。实际实验过程中,由于环境温度以及设备影响,导致测量数据不理想。在忽略外界因素的影响下,对灯丝电压、控制电

压、拒斥电压的参数设置不当等,是实验结果不理想的常见原因。本文通过对实验中常见的示波器图像问题进行分析,工作参数进行设置处理,从而减少实验中的误差。

在弗兰克-赫兹实验中,通过改变外界电压使电子所携带的能量得到增强。当电子所携带的能量达到氩原子第一次激发所需要的能量时,电子

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-10-09

作者简介: 鲍华,男,西藏大学理学院实验中心助理实验师,1120710608@qq.com;汪亚萍,女,西藏大学理学院实验中心中级实验师。

引文格式: 鲍华,王文清,汪亚萍. 弗兰克-赫兹实验中常见问题分析及解决[J]. 物理与工程,2022,32(6):153-158.

Cite this article: BAO H, WANG W Q, WANG Y P. Analysis and solution of common problems in Frank-Hertz experiment[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 153-158. (in Chinese)

与氩原子发生非弹性碰撞,实现能量转移,使得氩原子由基态跃迁至第一激发态。

该实验在数据观测以及处理中常常伴随着各种问题,例如读数不准确、图像波峰波谷不清晰等。本文对于这些常见问题进行列举说明,并对产生原因进行分析。对于实验中不同电压工作参数的设置,通过多次实验得到最佳参数,并与厂家所提供的参数做对比,设置合理的误差区间。

## 1 基本实验原理

弗兰克-赫兹实验原理如图 1 所示<sup>[1]</sup>。实验中通过对于灯丝电压、控制电压  $U_{G1K}$ 、加速电压  $U_{G2K}$ 、拒斥电压  $U_{G2A}$  四个电压参数进行设置来观测原子能级。通过设置拒斥电压,使得示波器中观测的电流发生明显的变化,从而使原子的能级跃迁直观地表现出来。

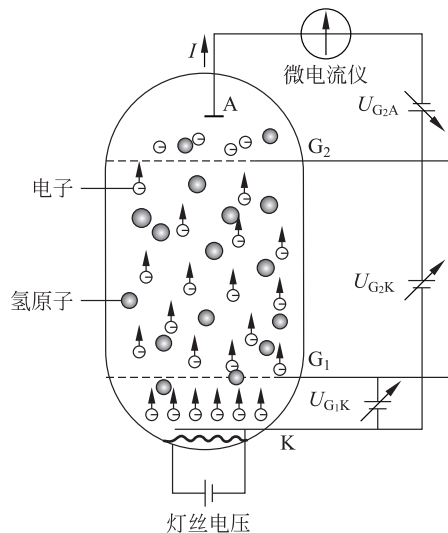


图 1 弗兰克-赫兹实验原理图

实验中,电子由阴极 K 发出,在控制电压  $U_{G1K}$  的作用下到达  $G_1$ ,  $U_{G2K}$  使得电子被加速并向  $G_2$  运动。在此过程中,电子与氩原子发生两种碰撞<sup>[2]</sup>,即弹性碰撞与非弹性碰撞。当电子的能量小于氩原子的第一激发能  $eU_1$  时,与氩原子只发生弹性碰撞(损失能量小或不损失能量)。当  $U_{G2K}$  达到氩原子的第一激发电势时,在  $G_1$  与  $G_2$  区间内电子将与氩原子发生非弹性碰撞。由于电子携带的能量被氩原子所吸收,氩原子将会从基态跃迁到第一激发态。继续加大  $U_{G2K}$ ,电子携带的能

量将不在第一激发电位附近,电子与氩原子的碰撞形式变为弹性碰撞<sup>[3]</sup>,  $I_A$  继续增大。以此类推,随着加速电压  $U_{G2K}$  的不断增大,在  $G_2$  区间内电子会与氩原子发生多次非弹性碰撞,使  $I_A$  出现周期性起伏变化而形成周期性曲线。在该曲线中,相邻两峰值所对应的加速电压之差即氩原子的第一激发电势  $U_1$ 。

## 2 实验常见问题及分析

### 2.1 实验图形及问题分析

从实验图像可以知道,相邻两个峰峰值差,为氩原子的激发电压,约为 11.5V。但是在实际操作中得到的实际图形可能会出现以下几种问题。

#### 2.1.1 第一激发电位无法观测

在实验所得图像图 2 中,可以看出,第一激发电位是无法观测的。产生该问题的原因一方面是示波器的幅度设置存在问题,另一方面是氩原子与电子在第一激发电位发生碰撞的几率较小,使得极板电流变化不明显。

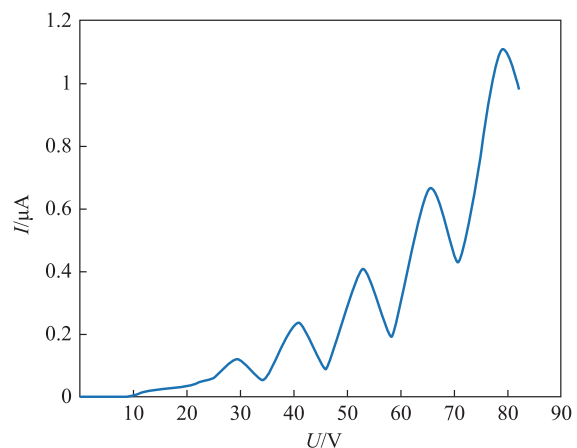


图 2 第一激发电位消失,无法观测

由于设备本身原因无法观测到第一激发电位的,一般可以忽略第一激发电位的影响。因示波器产生的图像问题,一般可以通过调节示波器参数来得到稳定的图像。观测过程中图像不稳定的原因一般是示波器的接入问题,可通过改变示波器的接入方式以及调节同步输入输出使图像到达稳定状态。而由于 X, Y 幅频设置不合理导致的第一激发电位无法观测问题可以通过调节幅频来调节图像。

### 2.1.2 峰谷值问题

从实验所得图像图 3 中可以看出,第二激发电位的峰谷值小于第一激发电位的峰谷值。根据实验原理,电压增大,电子的动能变大,达到基板的电子数目必然会变多,从而导致电流变大。但是在实际图像中,可以看出随着电压的增大,电流反而变小。对于该问题的产生,可以从碰撞过程本身以及拒斥电压的设置来考虑。实验的曲线下降阶段不是迅速下降,而是逐渐下降的,这是由于碰撞中几率的存在。众所周知,原子间存在着间隔,所有碰撞不是连续立即发生的,而是根据碰撞几率来运动的。碰撞过程需要时间,那么其曲线就不是断层式下降,而是渐变式下降。上述问题的产生原因,可能是由于在第一激发电位中碰撞发生不完全,部分电子未与氩原子发生碰撞,能够到达基板,接收到的电子数目较多,导致输出的电流值较大。而第二激发电位中电子碰撞较完全,到达基板的电子数目较少,导致其电流值变小,从而导致第二激发电位的峰谷值小于第一激发电位的峰谷值。

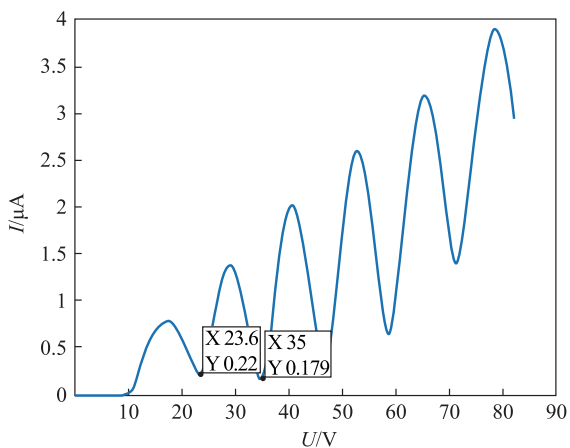


图 3 第二激发电位对应的电流值,远小于第一激发电位

另一方面,从拒斥电压的设置考虑,若拒斥电压的参数过大,对电子的筛选作用加大,将导致更多能量较低电子被过滤,到达不了阳极,致使电流减小,可能出现第二激发电位峰谷值低于或者等于第一激发电位峰谷值的现象。但随着加速电压的增大,电子携带的能量值变大,使得到达阳极电子增多,后续图像逐渐趋于正常。

### 2.1.3 图像中可能出现波谷值为零

在实验中,还可能得到波谷值为零的现象,如

图 4 所示。对于该现象产生的原因,做出如下分析。在实验中,由于拒斥电场的存在,会使未达到拒斥电场能量的电子无法到达极板,没有办法产生电流。而在实际实验中,由于电子发生碰撞之后,自身能量不足,无法越过拒斥电场到达极板产生电流,就会产生波谷值为零的情况。针对这一现象,可以通过调节拒斥电压的值,来观测图像产生的变化。此外,考虑灯丝电压的影响,当灯丝电压太小时,发射的电子数不足,也会产生电流为零的现象。以上两种原因引起的电流值为零的情况,均可通过调节电压来进行改善。对于实验仪器本身引起的误差及问题,就需要从硬件方面来处理解决。

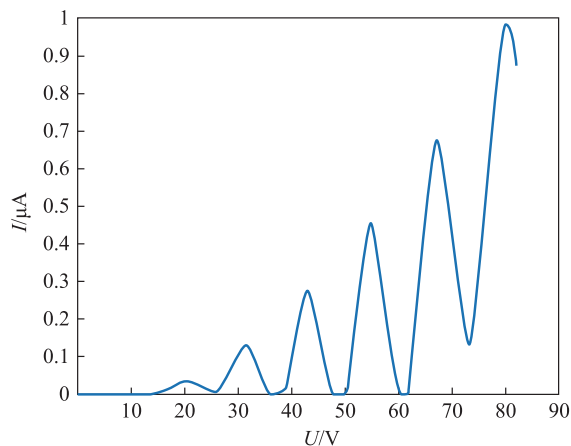


图 4 处于激发电位时,可能出现电流值为 0 的情况

## 2.2 F-H 管老化问题

在弗兰克-赫兹实验中,处于正常工作状态的 F-H 管可以根据不同的参数设置,得到不同的实验曲线。但是对于已经老化的 F-H 管,需要学生在实验时进行识别,避免对实验结果造成影响。识别方法较为简单,可以通过多次设置实验参数观测其图形是否正常。如图像正常,则证明 F-H 管不存在问题。若多次设置参数后,实验图像仍不正常,可以考虑该 F-H 管已经老化,需及时更换以免影响实验教学的开展。

根据多次实验经验,若 F-H 管暂时无法更换,则可以尝试在设置好工作参量后,加长预热时间或者反复测试  $I-U$  曲线,该 F-H 管可能会暂时进入较稳定状态<sup>[4]</sup>。当然,上述方法只是短暂地使 F-H 管进入稳定的工作状态,对于老化问题没有办法根本解决。在实际教学中,应及时与维修人员联系,更换老化的 F-H 管。也可根据实际教

学情况,将老化的 F-H 管与正常 F-H 图像进行对比,加深学生对于实验图像的理解以及对于不同图像产生的原因进行分析。

### 3 实验参数及误差分析

影响弗兰克-赫兹实验的主要参量是灯丝电压、控制电压  $U_{G1K}$  和拒斥电压  $U_{G2K}$ 。以上参量对于弗兰克-赫兹实验的影响较大,实验中通过控制变量法来得到具体的实验数据,进行定量分析。在具体的实验过程中,通过选取适当的间隔,设置不同的参数来进行实验。将实验中设置的参数与厂家提供的参数进行对比<sup>[5]</sup>,讨论其误差率以及上文中图像存在的问题。

#### 3.1 灯丝电压对实验的影响

保持控制电压以及拒斥电压不变,只是改变灯丝电压参数,观测其图像产生的变化。

厂家提供的参数为 2.6V,在实验时取间隔 0.2V 来进行多次试验,分别测出 2.2V、2.4V、2.6V、2.8V、3.0V 时的实验曲线。通过观测其实验曲线的不同得到灯丝电压对于实验的影响。

由图 5 中可以看出,灯丝电压对于波峰波谷值出现位置的影响较小<sup>[6]</sup>,但是对于电流的幅度影响较大。从图中可以看出,当灯丝电压较小时,其电流较小。这是由于灯丝电压影响电子的产生。当灯丝电压较小时,阴极工作温度较低,发射电子较少,故产生极板电流小。当灯丝电压较大时,图形波峰波谷较为明显,整体图像较为清晰。这是由于大量电子的发射使得电子与氩原子发生大量碰撞,电流变化较为直观明显。但是,灯丝电

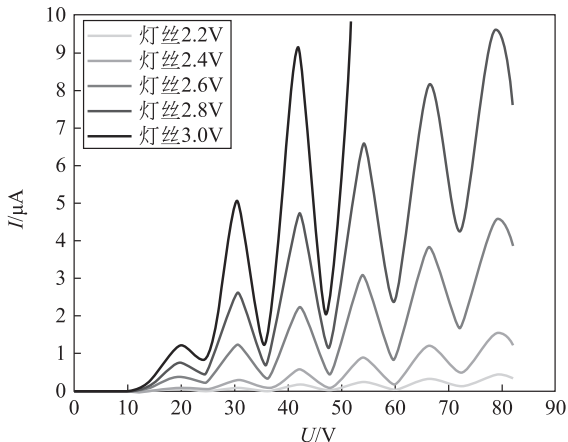


图 5

压是否越大越好?通过实验图像可以看出,在较大的灯丝电压下,电流档位变大,阳极电流超过了设置的量程(发生溢出现象),只有换挡才能继续测量。这对于实验数据的对比以及在同档位条件下的观测,存在不便。另一方面,灯丝电压过高对于实验仪器本身具有较大的影响。过高的温度会对阴极造成损坏或者烧坏加热灯丝,造成 F-H 管的老化。

只有当灯丝电压增加到中间位置时,阳极电流迅速升高,实验曲线的波动性减小,逐渐趋向于平滑曲线。得到较好的实验图像以及实验结论,使学生可以得到较好的实验结果。上述实验中,可以看出灯丝电压偏大或者偏小,都会对实验造成影响。但是,灯丝电压较小可以直接从图像中判断解决,而灯丝电压较大对于实验的影响无法从图形中进行观察。当发现其影响时,仪器本身已经被损坏,造成后果无法修复。所以,在实际操作过程中,灯丝电压的设置可以从小往大调节。避免灯丝电压过大,造成灯丝烧毁,无法实验。

#### 3.2 控制电压对实验的影响

保持灯丝电压以及拒斥电压不变,只是改变控制电压参数,观测其图像产生的变化。

厂家提供的参数为 2.0V,在实验时取间隔 0.2V 来多次试验,分别测出 1.6V、1.8V、2.0V、2.2V、2.4V 时的实验曲线。通过观测其实验曲线的不同得到控制电压对于实验的影响。

在图 6 中可以看到,控制电压对于电流的波峰波谷值出现位置影响较小。但是在一定范围内,对于整体的电流值存在线性影响。即电流值随着控制电压的增大而增大,对于其他因素无影

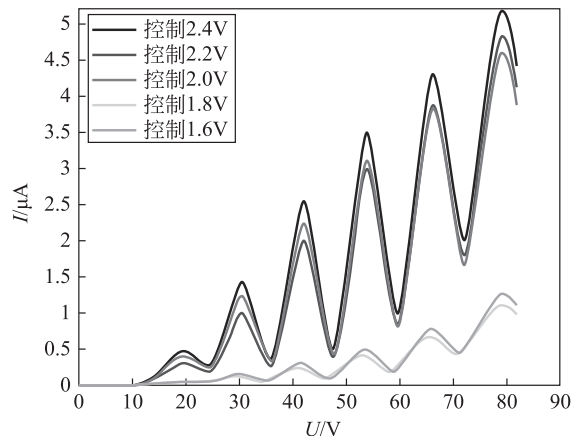


图 6

响。产生该影响的原因是,控制电压对于电子进行加速,使之获得一定的初始加速度,到达碰撞区与氩原子发生碰撞。随着控制电压增大,电子本身具有的能量变大,到达极板 A 的电子数量增多,直观体现为极板电流变大。

在实际比实验中,发现控制电压的值一般远小于加速电压的值,这是因为,一旦控制电压过大,很容易错过氩原子的第一激发电位。从上图图像来看,最合理的电压值为 2.0V,其图像平滑稳定且波峰波谷值明显。

根据实验可以看出,厂家提供的理论值与实际实验中参数的最佳值较吻合。但是,也有一些设备的误差一般在 10% 左右,在开始实验教学之前,可以提醒学生调整参数值,并不一定必须按照厂家提供的参数来进行实验。

### 3.3 拒斥电压对于实验的影响

保持灯丝电压以及控制电压不变,只是改变拒斥电压参数,观测其图像产生的变化。

厂家提供的参数为 9.0V,在实验时取间隔 2.0V 来多次试验,分别测出 5.0V、7.0V、9.0V、11.0V、12.0V 时的实验曲线。通过观测其实验曲线的不同得到拒斥电压对于实验的影响。

从图 7 可以看出,拒斥电压对于试验曲线的影响较大,在拒斥电压较小时,阳极电流出现溢出现象。这是由于拒斥电压会影响到达极板的电子数量,从而使电流变化较大。因为较小的拒斥电压对于电子运动无法起到阻碍作用,即使电子与氩原子发生碰撞以后,电子能量遭到损失<sup>[7]</sup>,剩余能量依然能够克服拒斥电场,到达极板,产生大于阳极量程的电流,发生溢出现象。

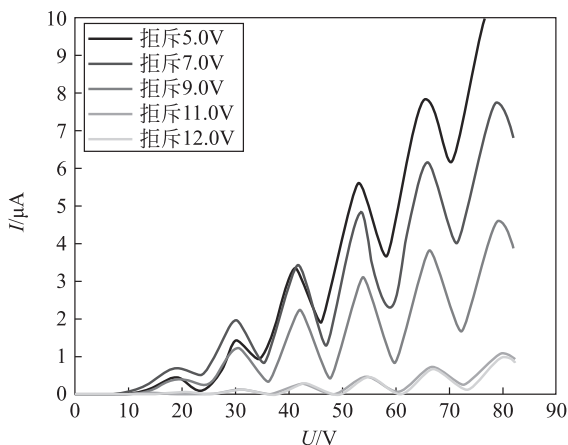


图 7

从图像中可以看出,随着拒斥电压的改变,图像的波峰波谷值会发生偏移。该现象产生的原因是,随着拒斥电压增大,电子克服拒斥电压所需要的能量也需要增大。由于非弹性碰撞的发生,失去能量后的电子无法通过较大的拒斥电压,也就无法产生电流。但随着加速电压增大,电子本身携带的能量增大<sup>[8]</sup>,达到极板的电子数增多。与较小的拒斥电压时相比,到达极板的电子数目可能未发生变化。但是,电子本身携带的能量会发生变化,远大于较小拒斥电压的能量。在图像上直观的体现为,电流会向左发生偏移,这主要是由于电子携带的能量不同。

根据图像继续考虑拒斥电压过大带来的影响。当反向电压较大时,单位时间内到达阳极的电子数目比较少。这时候图像的波峰波谷值会较为明显,对于激发电位的观测与计算较为方便。虽然在该情况下实验曲线的峰谷值区别明显,但是过大的拒斥电压会使大量发生碰撞的电子无法到达极板,可能产生峰谷值电流为 0 的情况,对于学生数据观测具有影响。此外,过大的拒斥电压也影响了其他电子的速度,使一部分电子在没有发生非弹性碰撞的情况下也无法到达极板,所以不能将拒斥电压设置过大,否则影响实验结果,导致实验仪器损坏。

从上述实验图像以及理论分析中可以看出,合理的拒斥电压值为 7.0V、9.0V,与厂家提供参数相差不大。学生在实验时,可参照厂家提供的参数进行微调,一般浮动范围不超过正负 10%。可多次实验来获得最佳实验曲线。

## 4 结语

本文在弗兰克-赫兹实验的基础上,对于常见的图像问题进行分析并给出解决办法。在对于图像问题进行解释分析时,有助于学生理解内部蕴含的理论知识以及提升自我探究能力,帮助学生带着问题带着思考去学习。而对于老化的 F-H 管,也列举其可能产生的实验结果,避免学生在实验过程中走弯路。对于实验参数的设置,通过大量的实验得出厂家提供的理论值与实际实验中参数的最佳值往往存在着一定误差的结论。其误差一般在 10% 左右,在开始实验教学之前可以提醒

学生,并不一定必须按照厂家提供的参数来进行实验。实验教学本身就是学生动手参与,从结果中发现问题并进行学习的一个过程。而在实际实验教学中,对于上述存在的问题,可以鼓励学生自行分析探究,采用引导式的方法使学生得到相应的结论,从而增强学生在学习过程中的参与感,满足学生在学习过程中的成就感。

#### 参 考 文 献

- [1] 王杰,司嵘嵘.确定弗兰克-赫兹实验最佳工作参数的方法改进[J].大学物理实验,2018,31(5):1-5.  
WANG J, SI R R. An Improved Method of determining the best working parameters of Franck-Hertz experiment[J]. Experiment of college physics, 2018, 31(5):1-5. (in Chinese)
- [2] 河南东微电子材料有限公司.一种延长靶材使用寿命的磁控溅射装置:201910353332.0[P].2019-04-27.
- [3] 苟睿健.第一栅压对 F-H 实验曲线影响的研究[J].大学物理实验,2018,31(4):39-42.  
GOU R J. Study on experimental curve in Franck-Hertz experiment affected by first grid voltage[J]. Experiment of College Physics, 2018, 31(4): 39-42. (in Chinese)

(上接第 152 页)

#### 4 结 语

大学物理实验的教学模式应该是灵活的、开放的,在教学过程中,应时刻以学生为主体地位,充分发挥学生的主观能动性,用科学态度激发兴趣导向,以使学习效果最大化。大学物理实验是学生在大学中最先接触的最基础实验,是科学实验认知的基础,是培养学生创新能力的基础,抛开基础去谈创新也就成了无源之水、无本之木。大学物理实验在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础<sup>[6]</sup>。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。大学物理实验“基础-进阶-高阶”教学模式,通过分层次、分阶段教学,培养了理论联系实际能力、科学实验能力、创新和实验设计能力,使学生受到科学世界观和科学态度的教育,提高了学生的科学素质,为以后课程的学习和科研工作打下基础。

#### 参 考 文 献

- [1] 张燕,谢卫东.大学物理实验教学考核现状及分析[J].科

- [4] 浦贤杰,刘高斌,何光宏,等.弗兰克-赫兹实验不稳定状态的应对措施[J].物理实验,2017,37(7):1-5.  
PU X J, LIU G B, HE G H, et al. Solutions for the unstable state in Franck-Hertz experiment[J]. Physics Experimentation, 2017, 37(7): 1-5. (in Chinese)
- [5] 司斌.可调频率禁带设计方法研究——以进气消声器为例[D].安徽:合肥工业大学,2014.
- [6] 白忠,苗仁德,林上金,等.夫兰克-赫兹实验中管极电压对实验曲线影响的研究[J].实验室研究与探索,2015,34(6):59-62.  
BAI ZH, MIAO R D, LIN S J, et al. Study on experimental curves affected by tube-pole voltage in Franck-Hertz experiment[J]. Laboratory Research and Exploration, 2015, 34(6): 59-62. (in Chinese)
- [7] 张美芸.阻变存储器参数离散性及阻变机制研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
- [8] 陈文岳,韩跃新,陈晓龙.X射线辐射分选的原理及其应用[J].现代矿业,2013,29(4):88-91.  
CHEN W Y, HAN Y X, CHEN X L. The principle and application of X-ray radiation sorting[J]. Modern mining, 2013, 29(4): 88-91. (in Chinese)

技风,2021(36):28-30.

- ZHANG Y, XIE W D. Current situation and analysis of college physics experiment teaching assessment[J]. The Wind of Science and Technology, 2021(36): 28-30. (in Chinese)
- [2] 刘晶.大学物理实验课程学生学习现状调查研究[D].上海:上海师范大学,2017.
- [3] 王亚伟,乐永康,钱飒飒,等.大学物理、大学物理实验两门课程现状调查报告及总结[J].物理与工程,2016,26(4):45-54.  
WANG Y W, LE Y K, QIAN S S, et al. Investigation report and summary of college physics and college physics experiment courses [J]. Physics and Engineering, 2016, 26(4): 45-54. (in Chinese)
- [4] 曹峰,纪纬,邓柏昌.大学物理实验教学考核的几点思考[J].大学物理实验,2019,32(5):126-128.  
CAO F, JI W, DENG B C. Some thoughts on the examination of college physics experiment teaching [J]. College Physics Experiment, 2019, 32(5): 126-128. (in Chinese)
- [5] 王旗.大学物理实验[M].2版.北京:高等教育出版社,2019.
- [6] 李永涛,张红光,陈伟,等.大学物理实验课程创新教学改革与实践[J].大学物理实验,2021,34(5):122-124.  
LI Y T, ZHANG H G, CHEN W, et al. Teaching reform and practice of college physics experiment course innovation [J]. College Physics Experiment, 2021, 34(5): 122-124. (in Chinese)