



利用示波器和信号源分析电学黑盒子

——第35届中学生物理竞赛决赛电学实验试题讨论

王锦辉 杨文明 周红 刘嘉滨 沈学浩 王宇兴

(上海交通大学物理与天文学院 上海 200240)

(收稿日期:2019-02-13)

摘要:第35届全国中学生物理竞赛决赛实验试题电学第一部分要求考生利用示波器和信号源判断黑盒子中的电路结构. 标准答案只要求给出实验结论,并未指出具体测量方案. 以下给出了一种详细的分析方法.

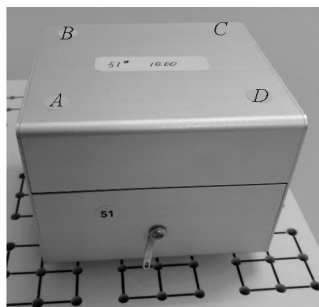
关键词:物理竞赛 黑盒子 示波器 信号源

电学黑盒子是国内外各类物理竞赛中经常见到的试题类型. 在全国中学生物理竞赛实验指导书中也作为一个重要实验被列出^[1]. 虽然黑盒子所用元件只有电池、电阻、电容、电感、二极管等元件,元件数目较少,结构简单,但实验内容非常丰富. 此种试题非常适合用来评判学生对电学元件基本特性的了解程度,实验设计能力及实验数据归纳、分析能力等.

大部分黑盒子实验是利用万用表测量各端点之间的电信号来推测内部的电路结构^[1~4]. 亦有试题利用示波器和信号源来分析黑盒子电路,但是试题中设置了取样电阻,实验的难度较低^[5,6]. 我们在第35届全国中学生物理竞赛电学决赛中设计了没有利用取样电阻,而直接使用示波器和信号源来分析黑盒子电路结构的内容^[7].

试题如下:

如图1所示,一只只有4个引出端口的黑盒子,内部有电路,其特点是任意两个端口都不通过其他端口形成封闭回路. 盒内有电阻、电容和电感,共3种4个元件,其中电阻值范围在1 k Ω 到30 k Ω 之间,电容值范围在100 pF到500 pF之间,电感值已在盒子表面标注(这是因为电感值要用来完成后面的实验内容,即计算真空和介质的介电常数). 要求利用示波器和信号源分析黑盒子内部电路结构,不要求测量电阻和电容的具体参数.



(a)正面



(b)反面

图1 自行设计加工的电学黑盒子

在试题中电阻值和电容值给出范围,可以帮助考生确定适宜的信号源输出信号频率. 为减小导线等分布电容影响,图1中电学黑盒子采用金属外壳,并且外壳接地,起到静电屏蔽作用. 黑盒子的4个引出端可以直接插入九孔板上,便于进行积木式的实验搭建.

本文提出一种系统地分析黑盒子内部电路的方法.

1 利用直流法测量电路拓扑结构

1.1 各端点之间直流法测量结果

信号源输出信号交流部分频率为 $1 \mu\text{Hz}$, 峰峰值幅度为 4 mV , 直流偏置电压为 2 V . 因为交流电压与直流电压之比小得多, 因此输出信号可以看成是直流.

分别取黑盒子上 A, B, C, D 点作为接地点, 其他点依次作为信号源输出点. 另外两个端点则作为示波器两个通道 CH1 和 CH2 的端点.

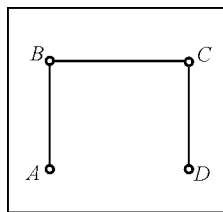
测量结果如表 1 所示.

表 1 直流测量数据表(电压单位: V)

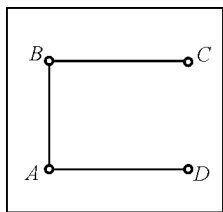
序号	输入	源	地	CH1	VDC	CH2	VDC
1	2.02	B	A	C	2.0	D	2.02
2	2.00	C	A	B	2.00	D	2.02
3	2.00	D	A	B	1.92	C	1.94
4	2.02	A	B	C	-0.012	D	-0.008
5	0.592	C	B	A	-0.0163	D	0.592
6	1.92	D	B	A	-0.009	C	0.034
7	2.00	A	C	B	-0.004	D	-0.007
8	0.592	B	C	A	0.584	D	-0.008
9	2.02	D	C	A	-0.02	B	-0.032
10	2.00	A	D	B	0.056	C	0.06
11	1.92	B	D	A	1.85	C	1.88
12	1.90	C	D	A	1.85	B	1.90

1.2 所有可能的电路拓扑结构

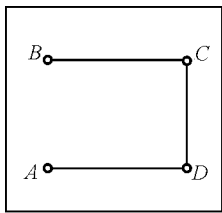
由题目的约束条件, “任意两个端口都不通过其他端口形成封闭回路”可知只有 8 种连接方式, 如图 2 所示. 图 2 中任一支路(用实线表示)均可能是电感、电阻、电容之一, 或其中二者, 或三者串、并联.



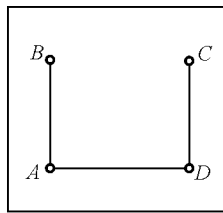
(1)



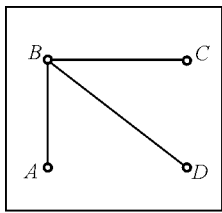
(2)



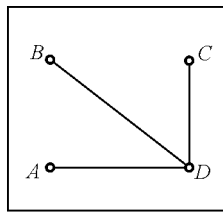
(3)



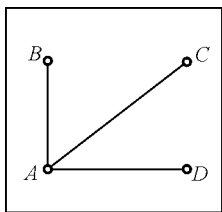
(4)



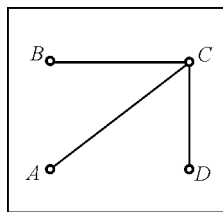
(5)



(6)



(7)



(8)

图 2 各种可能的黑盒子电路拓扑结构图

1.3 任一支路均不只含电容元件或电容和其他元件串联

如果以图 2 中结构(1)为例, 其中一个支路上只含电容元件或电容和其他元件串联. 如果电容位于 AB 支路上, 以 D 为接地端, 信号源接在 C 端, 则 A 端空置, 电压基本为零, 这与表 1 中第 12 项显示 A 端电压为 1.85 V 相矛盾. 因此, 电容不在 AB 支路上. 如果电容位于 BC 支路上, 则 A, B 端均空置, 电压基本为零, 同样与表 1 中第 12 项不符. 如果电容位于 CD 支路上, A 点接地, B 点接信号源, 则 D 点空置, D 点电压近似为零, 这与第 1 条 D 端电压为 2.02 V 不符, 因此电容也不在 CD 支路上. 因此对于图 2 中结构(1), 电容不会单独接在任一支路上. 同理对于其他结构, 电容亦不在任一支路上, 只能和其他元件并联.

1.4 对表 1 的结果进行分析确定电路拓扑结构

根据表 1 测量结果对图 2 中各种电路连接结构进行判断. (基于上述讨论, 在直流测量时可不考虑电容)

针对图 2 中结构(2)~(8), 实验测量和预期结果如表 2 所示. 可见实验测量和预期结果不一致, 排

除了图2中结构(2)~(8)的存在可能性.因此,黑盒子电路内部结构只能为图2(1).

表2 不同电路拓扑结构测量结果和预期结果

结构	测量方法 (表1中序号)	测量结果	预期结果
结构2	1	D点电压为 2.02 V	D点电压 为零
结构3	12	A点电压为 1.85 V	A点电压 为零
结构4	1	C,D点电压分 别为 2.0 V,2.02 V	C,D点电 压均零
结构5	8	D点电压为一 0.008 V	D点电压 为 0.592 V
结构6	11	A,C点电压分 别为 1.85,1.88 V	A,C点电 压均为零
结构7	2	B,D点电压分 别为 2.00,2.02 V	B,D点电 压分别为零
结构8	8	A点电压为 0.584 V	A点电压 为零

1.5 黑盒子中元件组合方式

实验竞赛试卷中明确指出只有电阻、电容和电感3种4个元件.则有3种组合方式.第一种是一个电阻,两个电感和一个电容;第二种是一个电阻,一个电感和两个电容;第三种是两个电阻,一个电感和一个电容.上述讨论表明,电容只能和其他元件并联,在直流测量条件下,不考虑电容.另外,电感内阻很小,因此,电感可看作一段导线.

在第一种组合方式情况下,无论电阻和两个电感如何在图2(1)的3个支路上分布,3个支路上至少有2个支路在直流测量条件下效果相当于导线.如果图2(1)中AB和BC支路作用相当于导线,则根据表1第1种方法测试时,A,B端短路,C,D点电压应接近零,但实际测量电压接近2V;如果图2(1)中BC和CD支路作用相当于导线,则根据表1第12种方法测试时,C,D端短路,A,B点电压应接近零,但实际测量电压超过1.8V.如果图2(1)中AB和CD支路作用相当于导线,则根据表1第2种方法测试时,B点电压应接近零,但实际测量电压2V.因

此第一种组合方式不存在.在第二种组合方式情况下,同样至少有两个支路在直流测量条件下相当于导线,则可类似于第一种组合方式进行测量,实际测量均与预期不符,亦排除第二种组合方式.因此,黑盒子中含有两个电阻、一个电感和一个电容.

1.6 任一支路中均不可能有两个电阻,或一个电阻与电感,或两个电阻与电感串联或并联

如果任一支路中有两个电阻,或一个电阻与电感,或两个电阻与电感串联或并联,则至少有两个支路电阻接近于零,相当于导线,则利用上节同样方法进行测量,亦可发现实际测量均与预期不符,可排除此种可能性.因此,两个电阻和一个电感分别在3个支路上.根据表1第5和第8种方式测试时,直流偏置只能加到0.592V,这意味着BC支路中连有电感元件,电感内阻很小,偏置电压加不上去.另外,按第11种方式测试时,D点接地,但C点电压并不为零,这意味着CD支路中有电阻.按第2种方式测试时,A点接地,但B点电压并不为零,这意味着AB支路中有电阻.按第10种方式进行测试时,B点和C点电压接近,这证明BC支路中直接连有电感元件.但C点电压仅为0.06V,这意味着AB支路电压降为1.94V,亦即AB支路电阻约是CD电阻的32倍.

2 用交流法进行测量电容位置

将图2(1)中C端接地,A端接信号源,示波器通道1,B端接示波器通道2.则随频率增加到106kHz,通道2观察到一最大值.通道2相对于通道1,相位从超前变为落后,亦即阻抗从感抗变为容抗.因此,电容必定与电感并联位于BC端点间.即如图3所示.

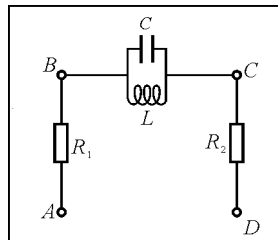


图3 黑盒子内部结构图

3 小结

在图3中,黑盒子制作过程中取 R_1 为30k Ω ,

R_2 为 $1\text{ k}\Omega$, L 约为 10 mH , C 为 100 pF . R_1 和 R_2 阻值之比为 30, 和实际测量的电阻比基本一致.

本文表明通过直流和交流两种实验方法, 可以只利用示波器和信号源, 而不借助于取样电阻来分析出黑盒子的内部电路结构. 作为一种新的电学黑盒子试题设计方案, 该方法值得进一步推广.

参考文献

- 1 吕斯骅. 全国中学生物理竞赛实验指导书. 北京: 北京大学出版社, 2006. 89 ~ 90
- 2 荀坤, 穆良柱, 陈晓林, 等. 第 43 届国际物理奥林匹克竞

- 3 赛实验试题简介. 物理实验, 2013, 33(1): 12 ~ 19
- 4 轩植华. “黑盒子”实验中的电容器. 物理实验, 2001, 21(4): 36 ~ 38
- 5 蒋明灿. 一个典型的电学“黑盒子”实验的分析与研究. 遵义师范学院学报, 2013, 15(1): 110 ~ 112
- 6 吕秋捷, 陈茵, 周子平, 等. 用示波器检测电磁学黑盒子实验. 物理实验, 2003, 23(6): 27 ~ 29
- 7 章俊杰, 汤志斌, 周子平, 等. 电磁学黑匣子实验的设计与解答 II. 物理实验, 2003, 23(7): 28 ~ 31
- 8 王锦辉, 杨文明, 孙存英, 等. 第 35 届全国中学生物理竞赛决赛实验试题评析. 物理实验, 2019, 39(1): 31 ~ 38

Analytical Electrical Black Box Using Oscilloscope and Signal Source

—Discussion on the Test Questions of Electricity Experiment in the
Final of the 35th Physics Competition for Middle School Students

Wang Jinhui Yang Wenming Zhou Hong Liu Jiabin Shen Xuehao Wang Yuxing

(School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The electrical black box in the experimental final of the 35th Chinese Physics Olympiad was asked to analyzed using digital oscilloscope and signal source. Only the conclusions are made in the standard answer, and the detailed method of analyzing the black box is not given. In this paper, a solution to the electrical black box is discussed.

Key words: physics competition; black box; oscilloscope; signal source

(上接第 62 页)

外的重要原因. 有些概念的建立, 是源于生活体验, 不知不觉就建立起来了. 而更多的物理概念, 是抽象思维的产物, 需要循着严格的逻辑关系来构建. 引领学生从不同的侧面、沿着不同的认知路径展开构建, 也是他们训练物理思维和物理方法的难得经历. 这正是以“三维目标”代替“双基”(基本知识 with 基本能力)的本意, 也是从“三维目标”走向“核心素养”的要求. 如果物理教学仅以知识为线索展开, 容易导致教学设计聚焦于知识, 仅仅专注于学生获得知识, 而忽视对学生核心素养的培养.

总之, 学习物理概念, 大多要在定性感知和定量计算两个方面, 深入研究并实施其构建过程. 法国科学家庞加莱曾说过: “物理学是一系列事实、公式和法则建立起来的, 就像房子是用砖砌成的一样. 但

是, 如果把一系列事实、公式和法则就看成物理学, 那就犹如把一堆砖看成房子一样. 不, 物理学要比组成它的事实、公式和法则要深刻得多!”^[4] 笔者通过对“动能”概念构建过程较为细致地剖析, 正是试图让学生把握“房子”而不是认识“砖石”.

参考文献

- 1 刘筱莉, 仲扣庄. 物理学史. 南京: 南京师范大学出版社, 2001. 116 ~ 118
- 2 人民教育出版社, 课程教材研究所, 物理课程教材研究开发中心. 普通高中课程标准实验教科书物理·必修 2 教师教学用书. 北京: 人民教育出版社, 2010. 98
- 3 余文森. 核心素养导向的课堂教学. 上海: 上海教育出版社, 2017. 53
- 4 物理课程标准研制组. 普通高中物理课程标准(实验)解读. 武汉: 湖北教育出版社, 2003. 150