



X 线机管电压补偿实验装置的研究与设计

王 彻, 王 旭, 王铖翊, 韩丰谈, 齐现英*

(山东第一医科大学(山东省医学科学院)放射学院, 泰安 271016)

摘要: 管电压补偿是保证 X 线机管电压参数准确性必不可少的重要环节, 但其原理具有复杂性和抽象性。临床使用的 X 线机不具备展示补偿原理及补偿效果的功能, 较难用于实验教学。由于缺乏必要的实验装置, 管电压硬件补偿电路及软件补偿算法的原理一直是医学影像设备学教学中的难点。为解决上述问题, 设计了管电压补偿实验装置。该实验装置不但能够形象演示管电压补偿前后的差异性, 使学生从本质上理解管电压补偿的原理和作用, 而且具有结构简单、操作简便等优点, 具有一定的实用价值和推广价值。

关键词: X 线机; 管电压预示; 管电压补偿; 实验装置

中图分类号: R318.6

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20210403](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20210403)

Research and Design of an Experimental Device for the Tube-Voltage Compensation of X-ray Machine

WANG Che, WANG Xu, WANG Chengyi, HAN Fengtan, QI Xianying*

(College of Radiology, Shandong First Medical University (Shandong Academy of Medical Sciences), Tai'an 271016, China)

Abstract: To ensure the accuracy of tube voltage of X-ray machine, voltage compensation for X-tube is essential. But its principle is complex and abstract. X-ray machines used in clinical practice haven't functions of displaying compensation principle and compensation effect, so it is difficult to use for experimental teaching. Due to the lack of necessary experimental equipment, principles of voltage compensation circuits and compensation algorithms have become difficult points of the teaching of medical imaging equipment. In order to solve the problem and improve the teaching quality, an experimental device for X-tube voltage compensation has been designed in this paper. The experimental device for X-tube voltage compensation designed in this paper can vividly demonstrate the difference of voltage values before and after compensation. By doing so, the principle of X-tube voltage compensation and factors affecting the accuracy of compensation can be demonstrated in a simple and clear way. So it is helpful for students to understand the principle and effect of voltage compensation essentially. In addition, the experimental device also has advantages like simple structure, simple operation and convenient demonstration. In a word, this experimental device has practical value and is worth popularizing.

Key words: X-ray machine; X-tube voltage prediction; X-tube voltage compensation; experimental device

X 线机是医院放射科必不可少的大型医学影像设备, 其电路构成及工作原理是医学影像技术专业核心专业课程“医学影像设备学”的重点内容^[1-4]。高压电路是 X 线机关键电路之一, 主要用于产生 X 线管曝光所需管电压, 它包括高压初级电路和高压次级电路两部分。高压初级电路的主要任务是进行管电压预示及管电压补偿; 高压次

级电路则主要完成管电压整流, 并将整流后的直流高压供给 X 线管。

管电压补偿原理具有复杂性和抽象性, 仅通过课堂讲授, 学生难以从本质上对其理解和掌握^[5-6]; 另外, 临床使用的实际 X 线机, 无法体现管电压补偿前后的差异, 也不具备展示补偿原理及补偿效果的能力, 因而也无法开展课堂示

收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2022-04-29

基金项目: 山东省大学生创新创业训练计划项目(S201910439128)。

作者简介: 王彻(1998-), 本科, 生物医学工程专业。

*通信作者: 齐现英(1978-), 博士, 副教授, 主要从事医学图像及数字医疗设备的教学与研究。E-mail: qxy9228@163.com

教^[7-8]。实际 X 线机的管电压补偿可采用硬件电路实现,也可采用软件算法实现。但无论采用哪种方式,理解其补偿原理是进行补偿设计的前提。特别是软件实现方式,补偿算法对用户来说是不可见的,这导致原本复杂的管电压补偿变得更加抽象和神秘。长久以来由于一直缺乏必要的实验装置,管电压补偿原理已成为医学影像设备教学中的一个难点,严重影响了教学质量。

基于此,为有效提高 X 线机设备的教学质量,并同时满足医学院校和医疗机构对 X 线机原理培训的需要,管电压补偿实验装置的研究具有相当实用性和紧迫性。本文设计的管电压补偿实验装置,不但可形象直观地演示管电压补偿前后的差异性,以简单明了的方式展示管电压补偿原理及其准确性,且具有电路简单,成本低廉等优点,可较好满足实验教学和学生课后探究使用^[9]。

1 管电压调节及预示过程

对人体不同部位、不同体型摄影时,所需管电压是不同的,这需要 X 线机具备一个调节范围很宽的管电压调节系统。工频 X 线机管电压产生过程如图 1 所示,主要由自耦变压器、高压初级电路、高压变压器、高压次级整流电路等组成。自耦变压器输出电压经高压初级电路送到高压变压器,经高压变压器升压和高压整流电路整流后为 X 线管提供曝光所需直流高压。由上述过程可知,通过调节自耦变压器的输出电压,可实现 X 线管管电压的可调性。

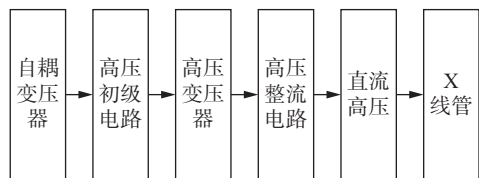


图 1 管电压产生过程

管电压控制 X 线图像的对比度,对图像质量影响很大^[10-12],因此在管电压调节和曝光过程中,都必须对管电压进行准确测量和指示。由于 X 线机管电压很高且曝光时间较短,在曝光过程中对管电压进行测量是非常困难的,所以实际 X 线机一般采用管电压预示法,即在 X 线管空载情况下,把本次曝光所需管电压预先指示出来。但是,管电压预示方式会出现曝光过程中实际管

电压低于预示管电压的现象。这是因为预示时,图 1 中高压初级电路处于断路状态,而曝光时,X 线管处于负载状态,图 1 中高压初级回路和高压次级回路均已闭合,电流在高压回路上产生电压降,使送到 X 线管两端的电压因回路损耗而低于预示值。所以,为保证管电压准确性,曝光前必须进行管电压补偿。由于管电流越大,回路电压降越大,送到 X 线管两端的电压越小,补偿时必须考虑管电流对补偿量的影响。在硬件电路补偿方式中,管电压补偿有电阻式补偿和变压器式补偿两种方式^[10],而电阻式管电压补偿电路结构简单,应用较为广泛。本文设计的管电压补偿实验装置是基于电阻式补偿方式进行的。

2 管电压补偿实验装置设计

为让学生从根本上体会管电压补偿对提高管电压准确性的作用,以及管电流对实际管电压的影响,实验装置应具备两个基本功能:

- 1) 补偿前后管电压差异性指示;
- 2) 不同管电流情况下管电压补偿量差异性指示。

为此,本实验装置的电路包括 3 个部分:

- 1) 管电压补偿及切换电路;
- 2) 高压次级模拟电路;
- 3) 继电器控制电路。

其中,管电压补偿及切换电路主要完成管电压测量及预示、管电压补偿、补偿切换等功能;高压次级模拟电路用于模拟 X 线管供电电路;继电器控制电路用于实现管电压补偿与否的切换。

2.1 补偿前管电压预示原理

X 线机管电压预示原理如图 2 所示。其中,ZB₁ 为自耦变压器,T₁ 为高压变压器,ⓀV₁ 为管电压指示表。由图 2 可知,自耦变压器的输出电压即为 T₁ 高压初级电压。根据预示原理,可将ⓀV₁ 直接并在自耦变压器输出端,其示数为自耦变压器输出电压与 T₁ 变压比的乘积。曝光前进行管电压设定时,调节ⓀV₁ 调节器指针在 ZB₁ 上的位置,改变自耦变压器的输出电压,此时ⓀV₁ 示数随之变化,达到曝光所需管电压时,ⓀV₁ 的示数即为无管电压补偿情况下本次曝光管电压预示值。

2.2 管电压补偿及切换电路设计

为使曝光时实际管电压与预示管电压一致,

需预先增加自耦变压器输出电压以补偿回路损失电压。如何做到自耦变压器输出电压增大而此时 kV 示数保持不变, 是示教演示要重点解决的问题。为解决此问题, 在图2管电压预示原理基础上进行管电压补偿电路设计。

如图3所示, kV 为比较用管电压指示表, 用于测量高压初级电压; XK 为管电流调节器, 用于完成管电流的调节; RW_1 为平移补偿电阻, RW_2 和 R_1 为斜率补偿电阻, 用于模拟负载时高压回路等效电阻。 RW_1 和 RW_2 采用抽头分挡电阻, 其挡位与管流调节器联动, 不同管电流情况下, 串入 kV 测量回路的电阻是不同的。 JC_{1-1} 、 JC_{1-2} 、 JC_{1-3} 为控制继电器 JC_1 的 3 个触点, 用于控制管电压补偿电路的接通与断开, 使电路在补偿和无补偿两种模式下切换。

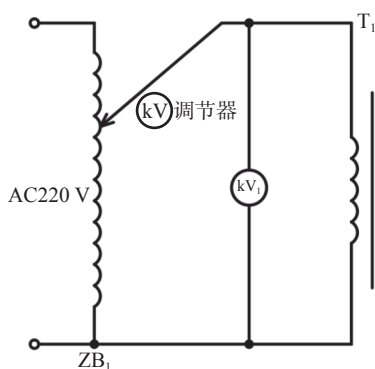


图2 补偿前管电压预示原理

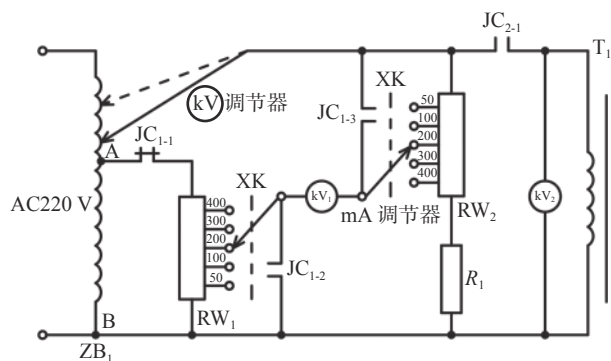


图3 管电压补偿及切换电路

实验装置的工作原理具体如下: 当 JC_1 得电时, 触点 JC_{1-1} 断开, JC_{1-2} 触点闭合使 RW_1 补偿回路断开, JC_{1-3} 触点闭合使 RW_2 补偿电阻短路, 平移补偿和斜率补偿电路均失去补偿功能。当 JC_1 失电时, 触点 JC_{1-1} 闭合, JC_{1-2} 触点断开, RW_1 补偿电阻接入 kV 测量回路。同时 JC_{1-3} 触点断开, 将 RW_2 接入 kV 测量回路。此时 RW_1 和 RW_2 均被

串入 kV 测量回路, 电路进入补偿模式。通过控制 JC_1 的得电与失电, 即可完成管电压补偿与否的切换, 为补偿前后管电压参数的测量提供了保证。

由图3可知, 把电路切换到管电压补偿模式下, 当管电流增加时, RW_1 和 RW_2 串入 kV 测量回路的有效电阻随之变大。如果保持图3中 kV 调节器指针与图2中指针位置相同, 由于 RW_1 、 RW_2 与 kV 内阻形成分压, 将导致图3中 kV 的示数小于图2中示数。为使图3中 kV 的示数与图2中 kV 示数保持一致, 必须将 kV 调节器指针向管电压增加方向滑动, 即增加自耦变压器的输出电压。设调节到图3虚线所指针位置时, 图3中 kV 示数恢复到图2中 kV 示数。此时由于自耦变压器输出线圈匝数增加, 送到高压变压器 T_1 的电压已经增加, 但 kV 示数却保持之前的预示值。此时 RW_1 、 RW_2 就模拟了当前所选管电流情况下回路的等效电阻, 而自耦变压器增加的电压用于抵消负载时高压回路上的电压降, 使 X 线管两端实际管电压与预示管电压基本一致, 如此便实现了管电压补偿。

2.3 高压次级模拟电路设计

高压次级模拟电路的原理如图4所示。图中 T_1 为高压变压器次级绕组, R_2 电阻用于模拟 X 线管, 触点 JC_{2-3} 用于控制高压次级回路的接通与断开。当 JC_{2-3} 断开时, R_2 电阻失电, 代表 X 线机进入空载状态, 此时可进行管电压调节、预示等; 当 JC_{2-3} 闭合时, R_2 电阻得电, 高压变压器 T_1 给 X 线管供电, 代表 X 线机进入曝光状态。

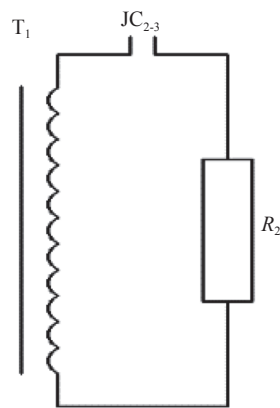


图4 高压次级模拟电路

2.4 管电压补偿实验装置总电路

将上述管电压补偿切换电路和次级电路组合在一起, 即为如图5所示的完整的管电压补偿实

验装置原理图。图中 JC_1 和 JC_2 两个继电器的控制电路如图 6 所示, 主要包括继电器 JC_1 、 JC_2 以及 4 个操作按钮, 该电路的主要作用是控制继电器 JC_1 、 JC_2 的得电与失电, 进而实现管电压补偿切换和 X 线管工作状态的切换。其中, AN_1 用于切断管电压补偿电阻, AN_2 用于接通管电压补偿电阻, 使实验装置在补偿与不补偿两种工作方式之间切换。 AN_3 用于接通 X 线管高压, AN_4 用于切断 X 线管高压, 使实验装置在空载和负载两种工作状态之间切换。

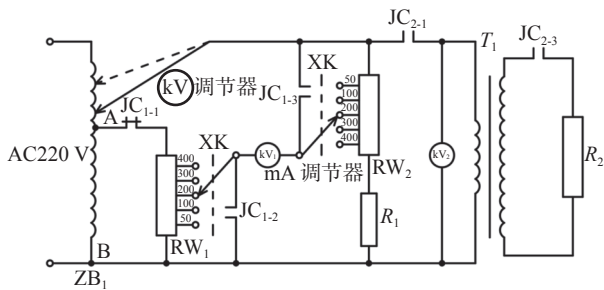


图 5 管电压补偿实验装置原理

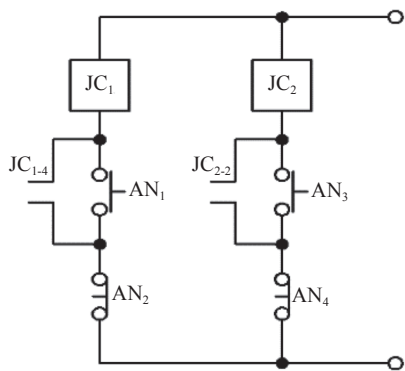


图 6 继电器控制电路

整个实验装置的工作原理如下: 按下按钮 AN_1 , JC_1 得电, JC_{1-2} 将 RW_1 短路、 JC_{1-3} 将 RW_2 短路, 电路进入无补偿工作模式; 按下按钮 AN_2 , JC_1 失电, RW_1 和 RW_2 补偿电阻接入管电压补偿回路, 进入管电压补偿模式; 按下按钮 AN_3 , JC_2 得电, JC_{2-1} 接通高压初级回路, JC_{2-3} 接通高压次级回路, X 线管进入曝光状态; 按下按钮 AN_4 , JC_{2-1} 、 JC_{2-3} 切断高压初次级电路, 曝光结束, X 线管进入空载状态, 此时可进行管电压调节及预示。

3 实验装置演示步骤设计

为直观形象地演示管电压补偿原理及作用,

补偿前后管电压大小差异性演示步骤如下。

1) 开机, JC_2 处于失电状态, 高压初次级电路处于断路状态。选定 50~400 mA 中某挡管电流, 将自耦变压器 ZB_1 调到某一输出电压, 按下按钮 AN_1 , JC_1 得电, 常开触点 JC_{1-2} 和常开触点 JC_{1-3} 闭合, 分挡电阻 RW_1 和 RW_2 均被短路, 千伏表 kV 直接并联在自耦变压器两端, 读出千伏表 kV 的示数, 并记为 V_1 。

2) 按下按钮 AN_3 , 接通继电器 JC_2 , 常开触点 JC_{2-1} 闭合, T_1 得电。常开触点 JC_{2-3} 闭合, X 线管模拟电阻 R_2 得电。用万用表测量 R_2 的电压并记为 V_2 , 则 $V_1 - V_2$ 为电路上的电压降。

3) 按下按钮 AN_4 , 继电器 JC_2 失电, T_1 初次级电路断开。按下按钮 AN_2 , JC_1 失电, 常开触点 JC_{1-2} 和 JC_{1-3} 断开, 分挡电阻 RW_1 、 RW_2 串入 kV 测量回路。此时 kV 示数下降, 调节 kV 调节器指针, 直到 kV 的示数再次恢复到 V_1 , 并将此时 kV 的示数记为 V_3 。

4) 计算 $V_3 - V_1$, 此差值即为选定管电流情况下管电压补偿值。

5) 改变管电流挡位, 重复第一到第四步, 记录数据。

6) 改变管电压, 重复第一到第五步, 记录数据。

7) 数据统计分析。

通过改变管电压预示值和不同管电流对应的补偿电阻, 上述过程实现了不同曝光参数下的管电压补偿。对示教数据进行分析, 即可得出如下结论: 管电压预示确实会导致实际管电压小于预示管电压, 而且电压降的多少与所选管电流有关, 所以管电压补偿时必须考虑管电流的大小。

4 结束语

本文设计的管电压补偿实验装置具有结构简单、成本低、操作简便等优点, 它将抽象原理形象化、简单化, 降低了学习难度、提高了教学质量、培养了学生的问题分析能力。因此, 该实验装置具有较高的实用价值和推广价值。

参考文献

- [1] 王艳, 聂生东. 基于卓越计划的 X 线机实验的设计[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(3): 256-258.

- [2] 宋莉, 王晓艳, 车琳琳. 医学影像技术人才培养模式的创新途径研究[J]. *中国高等医学教育*, 2019(2): 9-10.
- [3] 蔡惠芳, 杨德武. 医学影像设备课程教学现状分析及改革方案[J]. *中国医学装备*, 2016, 13(3): 137-139.
- [4] 张鹏, 刘立洁, 焦明克. 医学影像设备维保相关模式探究[J]. *中国医疗设备*, 2021, 36(3): 133-140.
- [5] 李光仲, 刘俊英, 闫鹏. 虚拟仿真技术在医学电子学多媒体辅助教学中的应用研究[J]. *中国医学教育技术*, 2009, 23(3): 290-292.
- [6] 戴逢亮, 孙九爱, 刘小瑾. 基于虚拟仪器技术的工频 X 线机单元电路实验系统的设计[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(8): 104-109.
- [7] 陈建方, 石波, 曹明娜. 虚实结合的影像专业实验模式构建[J]. *实验室研究与探索*, 2017, 36(9): 189-192.
- [8] 高春芳, 李国柱, 黄磊. 浅谈《医学影像设备学》实践教学改革[J]. *医学理论与实践*, 2019, 29(15): 2131-2132.
- [9] 胡姗姗, 吴彦达, 刘树钰, 等. LED 可见光通信演示实验装置的设计与研制[J]. *实验科学与技术*, 2020, 18(3): 140-144.
- [10] 石明国, 韩丰谈. 医学影像设备学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016, 54-56.
- [11] 韩丰谈, 朱险峰. 医学影像设备学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004: 79-80.
- [12] 陈乐, 强天鹏, 盛佩军, 等. 管电压对射线数字成像检测成像质量的影响[J]. *无损检测*, 2020(2): 12-16.

编辑 张俊

(上接第 116 页)

- [4] 刘艳红, 王娜, 李静. 以“解决问题”为导向的化学生物学综合创新实验设计[J]. *实验科学与技术*, 2020, 18(2): 122-125.
- [5] 茆安婷, 尹玉伟. 3种组织保存方法在进行流式细胞倍性分析和DNA含量测定中影响比较研究[J]. *中国兽医杂志*, 2018, 54(11): 26-29.
- [6] LU C W, KLEMENTA J D, YANG D F, et al. SUV39H1 regulates human colon carcinoma apoptosis and cell cycle to promote tumor growth[J]. *Cancer Letters*, 2020, 476: 87-96.
- [7] 王小杰, 张玉祥. 不同固定液对肿瘤细胞形态及细胞膜通透性的影响[J]. *解剖学报*, 2019, 50(3): 392-394.
- [8] 林国豪, 蒋旭, 孙丽纳, 等. 不同固定液对体外细胞系荧光蛋白淬灭及对胞内蛋白荧光染色的影响[J]. *现代生物医学进展*, 2019, 19(11): 2072-2075.
- [9] PETEIRA M A, DIAS A R, FARAJ S F, et al. Carnoy's solution is an adequate tissue fixative for routine surgical pathology, preserving cell morphology and molecular integrity[J]. *Histopathology*, 2015, 66: 388-397.
- [10] SANTOS M, OLIVEIRA H, PEREIRA J L, et al. Flow cytometry analysis of low/high DNA content (LNA/HNA) bacteria as bioindicator of water quality evaluation[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 774-781.
- [11] LAURA C R, MAURICIO R L, URREA-TURJILLO A I, et al. Effect of nutrients starvation in the cell cycle synchronization of cell suspension cultures of *Jatropha curcas* L[J]. *Current Plant Biology*, 2018, 13: 23-31.
- [12] ZHU L Y, CHEN L Q. Progress in research on paclitaxel and tumor immunotherapy[J]. *Cellular & Molecular Biology Letters*, 2019, 24/40: 1-11.
- [13] BULBAKE U, KOMMINENI N, BRYSEWSKA M, et al. Cationic liposomes for co-delivery of paclitaxel and anti-Plk1 siRNA to achieve enhanced efficacy in breast cancer[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2018, 48: 25-265.
- [14] 沈剑敏. 生物化学科研成果融入本科实验教学的研究[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(1): 208-211.

编辑 钟晓