



中等专业学校教学用书

X 射线机

B. K. 什勉辽夫著

高等教育出版社



中等專業學校教學用書



X 射 綫 机

B. K. 什勉辽夫 著
馬鳳祥 严家瑩 譯

高等教育出版社

A thick, textured horizontal line with a repeating pattern of small, dark, irregular shapes, resembling a woodcut or a heavy ink stroke, spanning the width of the page.

本書系根据苏联国立动力出版社 (Госэнергоиздат) 1953 年出版的什勉辽夫 (В. К. Шмелев) 著“X射线机” (Рентгеновские аппараты) 修正增订第二版译出。原书经苏联电机工业部学校管理局批准作为电机中等技术学校用教学参考书。

本书讲解了X射线机的电气部分, 是供给与X射线机的生产和修理及其现场安装有关的工程技术工作者之用的。同时本书是电机中等技术学校“X射线机”这一课的教学参考书, 并可供电工及动力学院学生在学“X射线技术”一课时参考。

本书第一、二、三、四各章由南京工学院马凤祥翻译, 第五、六、七、八各章由上海精密医疗器械厂严家瑩翻译, 并由马凤祥担任总校订。

X 射 线 机

В. К. 什勉辽夫 著

馬鳳祥 严家瑩 译

高等教育出版社 出版 北京琉璃厂170号

(北京市书刊出版业营业许可証出字第054号)

京华印书局印刷 新华书店总经售

统一书号15010·633 开本850×1168 1/32 印张11 1/8 字数281,000 印数0001—2,000

1956年4月第1版 1958年4月北京第1次印刷 定价(10) 1.70

序

苏联共产党第十九次代表大会关于 1951~1955 年發展苏联国民經济的第五个五年计划的指令，規定了所有国民經济部門进一步的提高和苏联人民的物質福利和衛生事業以及文化水平的增長，責成苏联的 X 射綫机制造業制造出日益完善的 X 射綫設備，以供医疗及工程上的应用。

同时，制造完善的設備仅是事情的一方面。制造出的設備还必须准确地安裝和合理地运用。只有在这些条件下，它才能充分地造福我們祖国而服务。

本書編著的目的是供給从事 X 射綫設備的生产和修理及其現場安裝的工程技术工作者們一本講述 X 射綫机电气部分的参考書。除此以外，对本書第二版的另一要求是供給电机中等技术学校“X 射綫設備的生产安裝和修理”專業的学生作“X 射綫机”一課的教科書。

在第二版中，加入了作者在 1951~1952 年的苏联杂志上所發表的关于 X 射綫机电气部分的設計的著作。其中既注意到診斷用的机器的特点，也注意到了工作時間比較長（治疗、材料檢驗、結構分析和綫譜分析）的机器的特点，因为这些特点决定着設計上的差异。此外，第一版全部材料都經過了仔細的审查和革新。書中的个别部分，凡是对初学这門課可能引起困难的地方，都用小号字标出；这些部分数量不多，并且可以略去它們而不致破坏材料敘述的連貫性。

在第一版中所使用的某些術語，原来不很恰当的，都已被取消。例如：“曝光”这个術語原来是当作在照相时流过 X 射綫管的

电量講的，現在已被刪去。術語“防護式”(機器)已用較老的術語“防電式”和新的術語“封閉式”來代替。在X射綫機領域內的術語，不能認為業已確定，在創建術語方面的工作還需要繼續下去。

凡是用千伏作單位來說到高壓大小的地方，都是指在一周內的最大值而言；如遇所指的是有效值，則在這些地方預先說明。對於低壓，如果沒有附帶說明，那就是指有效值而言。

作者謹向對第一版(在它出版以後)和第二版原稿提出了一系列寶貴意見的 А. М. 白姆達士(Бамдас)教授表示感謝，也感謝對第二版原稿提出寶貴意見的 В. В. 亞新斯基(Ясинский)教授、С. М. 斯蒂派諾夫(Степанов)工程師、Г. К. 耶符陀啓莫夫(Евдокимов)工程師和 Н. И. 馬林(Марин)工程師。所有這些意見都幫助了本書的改進。今後的意見請寄下列地址：莫斯科，水閘河岸街10號，國立動力出版社(Москва, Шлюзовая набережная, д. 10, Госэнергоиздат)。

作 者

目 录

序	v
緒論	1

第一章 X 射綫簡述

1-1. X射綫的發生和它們的基本性質.....	8	(a) X射綫診斷	21
1-2. X輻射与 X 射綫管陽極电压和 陽極电流的关系	14	(b) X射綫治疗	28
1-3. X輻射的量和質的量的度	20	(B)材料的X射綫檢驗	28
1-4. X射綫在医学上和工程上的应用	21	(r) X射綫結構分析	30
		(X) X射綫綫譜分析	32

第二章 X 射綫管和高压整流管

2-1. X射綫管	33	(r)結構分析用管	46
2-2. X射綫管的各種类型和它們的 特点	38	2-3. X射綫管的特性	52
(a)診斷用管	38	2-4. X射綫管在X射綫机中的工作 情况; X射綫管的試驗	58
(b)治疗用管	42	2-5. 高压整流管	61
(B)材料檢驗用管	44		

第三章 X 射綫机的高压部分

3-1. 主变压器	66	3-8. 裸高压导綫	96
3-2. 主变压器的有效电阻、漏电感和 內在电容	72	3-9. 电气安全问题	97
3-3. 主变压器的計算	75	3-10. X射綫机用高压电綫	99
3-4. 变比可变的主变压器	84	3-11. X射綫管的防护套	102
3-5. 加热变压器	87	3-12. 組合式变压器	106
3-6. 高压电容器	90	3-13. X射綫机高压部分的抗电强度	110
3-7. 高压發生裝置	92	3-14. X射綫管陽極电流的測量	115
		3-15. 高压的測量	117

第四章 X 射綫机的低压部分

4-1. 抽头式調节用自耦变压器	127	4-7. X射綫机运行的稳定化	154
4-2. 应用接綫器的电压調节	131	4-8. 电压降的补偿	164
4-3. 可变自耦变压器	133	4-9. 短路和过载的防护	165
4-4. X射綫管和高压整流管的加热 的調节	136	4-10. 信号设备和联鎖裝置	166
4-5. X射綫机的接入和切断	137	4-11. 無綫电干扰的抑制	167
4-6. 計时器	141	4-12. 控制台	168

第五章 X 射线机的整流线路

5-1. 半波自整流线路.....	169	5-10. 六整流管桥式整流线路.....	206
5-2. 半波自整流机器中 X 射线管的 电流和功率的计算.....	171	5-11. 脉动倍压线路.....	211
5-3. 半波自整流机器中的电压降.....	178	5-12. 脉动倍压线路机器中的电流、X 射线管功率以及电压降的计算.....	216
5-4. 电缆电容对半波自整流机器运 用的影响.....	183	5-13. 电缆电容在脉动倍压线路机器 中的影响.....	222
5-5. 原电路中有整流管的半波线路.....	185	5-14. 恒电压倍压线路.....	225
5-6. 副电路中有整流管的半波线路.....	189	5-15. 三倍增压线路.....	232
5-7. 电缆电容对于副电路有整流管 的半波机器的工作的影响.....	193	5-16. 多倍增压线路.....	239
5-8. 两个 X 射线管的自整流线路.....	197	5-17. 各种整流线路在 X 辐射方面的 比较.....	240
5-9. 四整流管桥式整流线路.....	199	5-18. X 射线机中的过电压.....	246

第六章 诊断用 X 射线机

6-1. 通論.....	256	6-5. 携带式诊断机.....	279
6-2. 诊断机中的电压降.....	259	6-6. 移动式和轻便固定式诊断机.....	281
6-3. 诊断机的调节系统.....	270	6-7. 中等功率和大功率的固定式诊 断机.....	288
6-4. 诊断机对网络的配合和网络电 压的校正.....	275	6-8. 脉冲式诊断机.....	299

第七章 治疗、材料检验、结构分析和线谱分析用 X 射线机

7-1. 通論.....	308	7-4. 结构分析和线谱分析用 X 射线 机.....	324
7-2. 治疗用 X 射线机.....	312	7-5. 对于 X 射线机电源的要求.....	332
7-3. 材料检验用 X 射线机.....	317		

第八章 产生极硬辐射线的机器

8-1. 通論.....	335	8-3. 静电发生器式机器.....	339
8-2. 谐振变压器式机器.....	336	8-4. 电子回旋加速器.....	341
参考書刊.....			346

緒 論

在 1895 年为 B. K. 倫琴(Рентген)所發現的不可見的射綫,一开始就因它所具有的强大穿透能力而引起了普遍的注意。原来这些不可見的射綫还能够通过可見光所完全不能透过的物質。

X 射綫最初得到广泛实际应用的領域,是医学方面的 X 射綫診斷。在俄国,当新射綫被發現之后的最初几个月內,已經有个别的科学家和医生除了研究这些射綫的性質之外,同时还开始將它应用于診斷。例如,偉大的物理学家和無綫电發明者 A. C. 波波夫(Попов),就是 X 射綫發生儀的最初創造者之一,这部 X 射綫設備由于他的倡議而在克琅斯塔得海軍医院得到使用。彼得堡軍医学院 Н. Г. 耶果罗夫(Егоров)教授和他的同事們,在 X 射綫医疗診斷的应用方面开展了巨大而著有成效的工作,他在 1896 年下半年就已經接受病人,組織正規的 X 射綫診斷照相工作。随着 X 射綫診斷之后, X 射綫治疗——利用 X 射綫医治某些疾病也开始發展起来。

同时,物理学家們对 X 射綫的本質和屬性进行了进一步的研究,發現了 X 射綫在通过晶体时的衍射現象。在 1913 年,著名的物理学家莫斯科大学 Г. В. 吳立夫(Вульф)教授推导出描述这种衍射的簡單方程式,因此就奠定了 X 射綫結構分析和 X 射綫綫譜分析的基础。这些物理—化学研究方法的著有成效的發展,是以远在 X 射綫發現以前的著名的俄罗斯晶体学家 E. C. 費多罗夫(Федоров)的出色的工作为基础的。

虽然俄国的学者和医生們迅速地响应 X 射綫的發現,并且在 X 射綫学說和实用 X 射綫技术方面作出了最有价值的貢獻,但是

只有在引起國民經濟和全體人民的整個文化事業迅速成長的偉大的十月革命之後，X射綫才在蘇聯開始了廣泛的應用。蘇聯的X射綫學醫生發展和改善了X射綫在醫療中的使用方法。在蘇聯整個國家內，一直到最遙遠的地方，人民都已經能夠享受到X射綫診斷和X射綫治療。

蘇聯的科學家們和工程師們在X射綫結構分析方面的研究工作，曾促進了蘇聯工業的許多部門中的工藝過程，特別是金屬的熱處理和冶金方面的工藝過程，建立在科學的基礎上。同時，X射綫結構分析也作為檢查工藝過程和生產成品質量的方法。X射綫光譜分析則為進行化學分析時有價值的輔助工具。

X射綫的一個很重要的應用領域是用X射綫檢驗材料，就是利用X射綫來透視物件，以探尋這些物件中的缺陷；這一個領域開始發展比較其他領域晚一些。和X射綫結構分析不同的是：X射綫結構分析是關於結晶物質的微观結構，而在材料的X射綫檢驗中是研究物件的宏观結構。在目前，用X射綫檢驗材料已被廣泛應用於蘇聯工業的許多部門中；在機器製造部門對鑄造和焊接的檢驗方面，它尤其得到大力的推廣。

由於在醫療上和工程上廣泛使用X射綫的結果，在蘇聯遍布了無數的X射綫工作室和實驗室網，為着祖國的福利，進行着積極而富有成效的工作，也因此促進着祖國順利地向共產主義勝利邁進。

我們也要指出X射綫在純粹科學方面的重要意義。近代原子物理學的發展，是和X射綫物理學的發展有着不可分割的聯系的。

X射綫在醫療上和工程上的廣泛應用，有需要製造出各式各樣專門的設備，總的名称就叫做X射綫設備。X射綫設備中最主要的部分是它的電氣部分，因為X射綫的發生以及它的強度和穿透能力的調節，正是同這一部分相關聯的。這個電氣部分也就是

本書所要講述的。

X射線的發生器是X射線管。它是具有兩個電極——陰極和陽極——的高壓電真空儀器。X射線是由于向X射線管陽極迅速運動的电子受到急遽的制止而發生的。电子被加于電極間的高電壓所建立的強大電場所驅動。電壓的大小通常為幾十乃至幾百千伏；電壓愈高，X射線的穿透能力就愈強。

按照獲得自由电子的方法，X射線管分為兩大類：离子管和电子管。在离子管中，自由电子因管內電極間的稀薄氣體（其壓力約當於 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 毫米的水銀柱）電離的結果而獲致。現代的离子管都做成可卸式並且與真空系聯用。在电子管中，為了獲得自由电子，應用了高真空（其壓力約當於 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 毫米水銀柱）中的熱电子放射現象。电子X射線管的陰極是鎢絲，鎢絲用電流加熱，作為自由电子的來源。現代的电子管照例是用焊封制成的，在運用時不需要抽氣泵。

离子管在歷史上產生于电子管之前。在目前，只有在X射線結構分析和X射線光譜分析方面，离子管才與电子管并用。其他一切應用X射線的領域內，都僅僅使用电子管^①。

X射線機是用來給X射線管饋供电能的電氣裝置。X射線機中最重要的部分是高壓電源。過去在X射線機中用的是感應圈。由於一些特殊的性質，感應圈式的X射線機主要用於饋供离子管。現代X射線機中的高壓電源，無論是饋供离子管的或者是饋供电子管的，都是高壓變壓器，而且照例都是單相的。

現代X射線機所具有的高壓，隨機器的用途而定，通常約為幾十乃至幾百千伏。在X射線機製造業中已達到的最高電壓為二萬萬伏。X射線機的長時間功率不超過幾個千伏安。這樣，電壓很

① 關於在X射線管中應用加熱的鎢絲作為电子來源的觀念，是發現光壓力的著名的物理學家和實驗家П. Н. 列別捷夫(Лебедев)在1910年首先發表的。

高而功率不大，是X射綫机的特殊标志。

X射綫机中的高压变压器也称为X射綫机的主变压器。主变压器的原繞組通常由电網路或者其他頻率為50赫的低压交流电源來饋供。副繞組在最簡單的場合中直接聯接到X射綫管的兩端，這時X射綫管是在交流电压之下工作。當陽極电位對陰極為負的半周中，X射綫管阻止了電流通過，因而它本身就成為整流器。在其他的場合中，高压都預先用機械整流器或者用整流管——高压真空兩極整流管或高压含氣兩極整流管——進行整流。在某些機器中，整流裝置具有高压電容器，它們使整流电压得以增高到变压器电压的二至三倍。

用機械整流器的機器在历史上產生于用整流管的機器之前。但現在整流管已完全把機械整流器從X射綫機製造業中排擠出去了。

除了由电網路直接饋電的X射綫機以外，還有一種脈沖X射綫機。裝置在脈沖X射綫機中的電容較大的高压電容器，在X射綫管電路斷開時被充電。在電容器被充電之後，就使它通過X射綫管放電，這時X射綫管便發出了強有力的短時間的脈沖X輻射能。

在現代的X射綫機中，X射綫管（高压整流管也一樣）的陰極燈絲所需電能，通常由饋供主变压器原繞組的同一交流电源饋給。因為陰極照例對地處於高压电位，所以陰極燈絲要用具有相當于副繞組的絕緣能力的加熱变压器來饋電。

主变压器、加熱变压器、高压整流管和高压電容器共同組成X射綫高压發生裝置（變壓——整流裝置）。高压發生裝置往往並不包括所有列舉的元件。大多數X射綫機沒有高压電容器。如果X射綫管是直接聯接到主变压器上的，那麼整個整流部分就沒有了。高压發生裝置的各個元件，或者是由高压導綫互相關聯起來的獨

立構成部分，或者全部共同地或部分地裝在公共的充滿絕緣油的箱內。

X射綫管借高压导綫与高压發生裝置相联接。在早先制造的敞开式机器中，高压發生裝置有着露出的輸出絕緣子，裸高压导綫就联接到这絕緣子上。在現代的封閉式或防电式机器中，X射綫管或者裝在專門的防护套內，并用柔軟的高压電纜和高压發生裝置相联接，或者同高压發生裝置一起放在公共的油箱內。这样，防护了工作人員免受高压的危險。而在医疗用的机器方面，也可防止病人接触高压电^①。假如X射綫管和高压發生裝置一起安放在公共的油箱內，那么它通常总是直接和高压变压器的輸出端相联接、并且在交流电压之下工作的。这样的裝置通常称为組合式变压器。

X射綫管或者裝置X射綫管的防护套^②，都被固定在專門的X射綫机架上，这一機構可以使X射綫管向着投照物进行調动。某些机架的結構，特別是X射綫診斷用的，可能是很复杂的。本書对机架將不加討論。

X射綫机高压部分的抗电强度安全因数等于30~40%，也就是远較同样电压的电力高压設備所具有的为低，后者的安全因数要达到250%以至更高些。这是因为在电力高压設備中，必須估計到自外界所引起的过电压，特別是数值可以达到很大的大气过电压；而在X射綫机中，只会有發生在机器本身中的过电压。由于X射綫机的功率比較小，限制这些过电压或者把它們完全抑制，是没有多大困难的。

降低抗电强度安全因数，可使X射綫設備的結構更加紧凑，并

① 防护套既可减少不需要的直射和散射的輻射綫透到外面去，同时又可限制射出的輻射綫束。

② 譯者注：我国通常称作“X射綫管头”。

且显著地使它的重量減輕，也使在应用条件下的設備所占据的面积大为减小。所有这些都增进了使用上的便利，并且無論是設備的价格或者在它的运用方面的費用都可减低。所采用的抗电强度安全因数在实际上是足够的，这已經为所有的X射綫裝置的运用經驗所証实。

X射綫机具备着一系列的控制機構，它們用来施行：接上机器的电源、調节X射綫管和整流管的加热电压、調节高压等等。此外，X射綫机还具有檢查机器工作的量度仪表和各种專門的設備。所有这些機構通常都集中在控制台中，控制台照例是做成可移动的。

按照其本身的用途，X射綫机分为下列几类：

- 1) 診斷机；
- 2) 治疗机；
- 3) 材料檢驗用机；
- 4) 結構分析和綫譜分析用机。

除了X射綫机这一名詞外，也有应用X射綫裝置这个名詞的。在这以前，一般都認為X射綫机包括X射綫管、高压导綫和机架在一起是X射綫裝置的一部分。这样的名詞对敞开式机器是合适的。現代防电式的X射綫机，照例在結構方面和其余各部分联在一起，成为一个整体。因此現在通常把整个構造称为X射綫机，也就是把“X射綫机”和“X射綫裝置”这两个名詞看做为一样的。

苏联的X射綫机制造业是在偉大的社会主义十月革命之后才建立起来的。它在第一个斯大林五年計划中获得了很大的發展，在那个时候，苏联的X射綫机工厂已經成長并且巩固了。苏联工厂生产的第一批X射綫机，是在В. А. 維德卡(Витка)和А. И. 特霍尔热夫斯基(Тхоржевский)的领导下制造出来的。还在第二个斯大林五年計划的时候，苏联实际上就已經停止輸入国外的X射

綫机了。

战后的年代是苏联X射綫机制造业蓬勃發展的时期。在这段时期中,苏联X射綫机工厂制造出許多新的X射綫机;这些机器被輸送到各个生产部門,并且用来滿足保健事業和工業上的需要。大量的X射綫机正在設計的阶段中。

除了X射綫机的生产外,苏联还出产各种X射綫管 and 高压整流管。苏联的第一批电子X射綫管,是在Ф.Н.哈拉特夏(Хараджа)领导下制造出来的。

第一章 X 射綫簡述

1-1. X 射綫的發生和它們的基本性質

X 射綫是屬於称为光的那樣的一種物質形態。它們與可見光的區別，是在於它們所具有的波長要比可見光的波長短得多，換句話說，X 輻射的光子能量要比可見光的光子能量大幾萬乃至幾十萬倍。

在實際應用中所使用的 X 射綫的波長，在 2×10^{-8} 厘米至 0.6×10^{-10} 厘米之間，後者已經進入到放射性物質的 γ 射綫的範圍內^①。X 射綫的波長通常用埃來量度，一埃等於 10^{-8} 厘米。因之，上述 X 射綫的實用波段是在 2 至 0.006 埃的範圍內。

對應於一定波長的光子所具有的能量，可從關係式

$$A_r = h \frac{c}{\lambda} \quad (1-1)$$

中找出，式中

A_r 是光子的能量；爾格；

h 是普朗克常數，等於 6.62×10^{-27} 爾格-秒；

c 是光速，等於 3×10^{10} 厘米/秒；

λ 是波長，厘米。

X 射綫管所發生的 X 輻射，一般由兩部分組成：

a) 連續綫譜；

b) 標識綫譜。

連續綫譜從某一決定綫譜界限的最短波長開始，而包含着各

① 指 X 射綫管在電壓達到 2000 千伏時所發生的輻射而言。

种可能波長的射綫。連續綫譜的發生过程可以陈述如下。由于和陽極物質微粒相互作用的結果，电子受到了制止。在被制止之前，所有的电子本来都具有相等的动能。这动能是电子在陰極和陽極間的加速場中运动而获得的，因此它等于

$$A_r = eU_a,$$

式中， e 是电子的电荷， U_a 是陽極的电压，就是X射綫管電極間的电压（由于电子自陰極出来时所具有的始初动能十分微小，故可以不計）。当电子被制止时，它的能量轉变为光子能和热能。电子被制止的情况并不是一样的：有的电子被制止时产生能量較大的光子，有的电子被制止时产生能量較小的光子。許多电子在被制止时它們的动能完全变为热能。在全部电子流的总能量中，变为X輻射能的只有極小的一部分，大約为千分之几或百分之几；所有其余的能量都轉变为热。关于这方面，我們要指出，正是由于陽極發热的緣故，使X射綫管所能容許的負載受到了限制。

因为在單位時間內輻射出的光子的数量畢竟是很多的，所以在輻射中总有帶着大大小小能量的光子，一直到相当于电子全部动能轉变为X輻射的某些最大能量的光子。按照公式(1-1)，具有最大能量的光子，对应于最短的波長；因此，最大的光子能量和最短的波長都取决于陽極的电压：

$$eU_a = A_{r_{\text{最大}}} = h \frac{c}{\lambda_{\text{最短}}}.$$

將 e 、 h 和 c 的值代入这公式中，我們就得出公式

$$\lambda_{\text{最短}} = \frac{12.35}{U_a}, \quad (1-2)$$

在这公式中，如果 U_a 用千伏表示， λ 就以埃計。如果光子能量以千电子伏来量度，公式(1-2)也可用作从波長到光子能量的換算。在应用于基本粒子时，已經广泛采用千电子伏这种能量單位。

標識綫譜由獨立的譜綫組成。這些譜綫的波長和陽極電壓無關，它們僅決定於制止電子的物質。

標識綫譜的激發過程，可以利用原子的行星模型來陳述如下。自陰極向陽極運動的電子，在陽極表面受到制止時，射入到某一原子的深處，並且在這時把沿着某一內層軌道運動的電子從原子中打出來，就在這個時候，產生了標識輻射的光子。因為那時原子的平衡狀態受到破壞，於是從某一離原子核更遠的軌道上的電子就要轉移到有空位的軌道上去。在每一軌道上，電子具有一定的能量，而且軌道離開原子核愈遠，這能量也就愈大。當電子從較遠的軌道轉移到較近的軌道上時，在原子內要釋放出能量，這能量就以標識輻射的光子輻射出來。

一定的一對軌道對應於具有一定能量的光子，因此，也對應於一定的輻射波長和標識綫譜中一定的譜綫。因為原子的電子殼層是因不同的化學元素而變化的，所以每一種化學元素都具有它自己的標識綫譜。

按照上面的說法，為了在一定的化學元素的標識綫譜中的、對應於電子到一定軌道上的轉移過程的綫系的激發，應該需要給予自陰極向陽極運動的電子以足夠的動能，使它能離開這軌道而跑到原子範圍以外去。這意味著，陽極電壓的大小必須不小於

$$U_k = \frac{12.35}{\lambda_k},$$

式中 λ_k 是對應於電子從最遠的軌道到給定軌道的轉移過程的譜綫波長， U_k 稱之為該綫系的臨界電壓。在表 1-1 中，舉出了某些化學元素的 K 系和 L 系的臨界電壓，這些電壓值對應於電子到最接近原子核的 K 層和 L 層電子群中的轉移過程。

標識綫譜的特殊性質只應用於 X 射綫結構分析的某些方法中和 X 射綫綫譜分析中。標識綫譜所具有的能量遠較連續綫譜的為