

电子与离子变换器

(工业电子学原理)

第二卷 离子仪器

И. Л. 卡加諾夫 著

清华大学电真空器件教研組譯

人民教育出版社

73.691

170

22

高等学校教学用书



电子与离子变换器

(工业电子学原理)

第二卷 离子仪器

И. Л. 卡加諾夫著

清华大学电真空器件教研组译

22530 4

1951.12.29
人民教育出版社

本書系根据蘇聯國立動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1955 年出版的卡加諾夫 (И. Л. Каганов) 所著“電子與離子變換器(工業電子學原理)” [Электронные и ионные преобразователи (основы промышленной электроники)] 第二卷譯出。原書經蘇聯高等教育部多科性及機器製造高等工業學校主管司評定為動力高等學校、電力高等學校以及動力系和電力系用的教科書。

原書共分三卷。第二卷講述離子器件，其中第一章講述離子管的基本過程及它的一般規律；第二章講述充氣二極管；第三章講述開流管；第四章講述汞弧管。

本書也可供在工業電子學方面工作的工程師參考。

本書由清華大學電真空器件教研組譯，其中第四章由南京工學院閔詠川校訂。

電子與離子變換器

(工業電子學原理)

第二卷 離子儀器

И. Л. 卡加諾夫著

清華大學電真空器件教研組譯

北京市書刊出版業營業新登記出字第 2 號

人民教育出版社出版 (北京景山東街)

京華印書局印裝

新華書店北京發行所發行

各地新華書店經售

統一書號 15010·1094 開本 850×1168 1/32 印張 11 1/16

字數 344,000 印數 0001—2,500 定價(7) 1.60

1961 年 12 月第 1 版 1961 年 12 月北京第 1 次印刷

(另精 6000 冊)

序

自从“电子与离子变换器”的第二版問世以来已有 15 年了，这本书主要是讲述离子技术的，在这 15 年中，离子技术不論从离子器件本身或从整个设备說来都經過了一系列質量上的改进，并且离子设备的应用范围显著地扩大了。例如，离子变流器的应用在所有各种电气运输中都有了非常大的增长。从前离子变换设备主要是固定的，用在重型变电所中把交流变为直流然后送到电网，近年来这些设备还用在于铁路車輛上，从而在很多场合下提高技术经济指标。在固定的直流电力拖动中，从小功率的设备起（在机器和机构的自动控制系统中作为执行組件）直到像軋鋼机及起重机这么大的电力拖动设备止，离子变换器都得到了广泛的应用。用在有色金属的电解中及化学工业中的变换器的功率就更大了。电点焊及电縫焊的技术的进步主要是由于应用了引燃管断續器。离子激磁在瞬变过程中具有小的惰性这一点大大地刺激了把功率最大的同步发电机由电机激磁改为离子激磁。最后，近年来变换技术的最重要的发展是直流电能的远距离傳輸由試驗阶段过渡到建立工业用的輸送綫。

离子技术在工业与动力系统中如此广泛的应用不能不反映到培养学生的工作上，所有的电工技术专业都以电子学的知識来充实学生。离子技术是大家熟知的“工业电子学”（或称为“电子学基础”）这门綜合性課程的第二部分。这门課程的第一部分是工业用的电子与半导体技术，这一部分已在本书第一卷中討論过。

在扩大以电子学普通課程来訓練电工技术专业和电能专业的学生的范围的同时，苏联高等教育部也在个别的国立动力学院建

立了工業电子学專門化。在莫斯科动力学院，这一專門化已成立十二年多了，并且已經建立了“工业电子学”专业。

为了与培养該專業的工程师这一任务相适应，这个專業的学生不只应该在电子学綫路方面(变换系統、工業用的电子控制和电子調节系統)得到广泛的訓練，还应该深入地了解离子管的物理性能、电的特性以及結構和制造工艺。这个專業的專業課程如下：(1)“电子技术”；(2)“离子管”；(3)“离子管的控制綫路与供給电路”。已于1950年出版的本書第一卷是課程(1)的教本。本卷(第二卷)的使命是作为“工業电子学”及“电子管”这两个專業学生所讀的离子管課程的教本，对于两个專業說来这門課程的大綱所包括的問題是相同的。

計劃写這本書时也預先考虑到利用本書的个别章节作为电机与电能專業的教學参考書的可能性(在“工業电子学”的普通教程出版之前)。本書亦有助于从事制造离子管及运用离子設備的工程人員加深自己的知識。

本書第三卷叙述与离子管的供給电路和控制系統有关的所有問題，該卷內容和本卷一起闡明有关离子技术各种問題的整体。

本書并没有对一切型式的离子管都加以討論，只討論那些作为整流器件的离子管(热陰極充气二極管、閘流管及汞弧管)。这几类离子管分別在本書的第二章、第三章与第四章中叙述。本書除了討論那些决定管的工作情况的現象以外，还討論管的特性、类型、參量和結構。把汞弧管(包括励弧管与引燃管)集中在一章中討論是因为励弧管与引燃管都是屬於具有汞陰極的同一类型的管，彼此只是点火系統的原理不同而已。

第一章是緒論，在这一章中除了討論离子管的分类外还討論某些表征离子管(整流器件)工作情况的一般規律。在所討論的規律中也包括一些最簡單的，这样做的目的是使电工学院和动力

学院的其他專業（非真空的專業）容易利用这本书作为教学参考書，这些專業的学生沒有学过准备課程“在真空中与气体中电的現象”。在开始写这本书的大綱时，曾考虑单独地写一章来討論輝光放电管和离子放电器，但書的篇幅不容許这样做，因此作者只限于在第一章中簡短地說明輝光放电管的原理。

因为已經出版了关于苏联工業电子学的發展历史的專門論文[参考書目 48]，故本書只提醒在离子管的制造的發展历史中最重要的事实。讀者如需較詳細的了解这方面的知識可翻閱上述專論。

本書的整个編写計劃和各章的內容都經過“工業电子学”教研組詳細地討論，使得作者采用了編写本書所依据的教学法原理。

評閱人物理数学科学博士 В. Л. 格蘭諾夫斯基(Грановский)教授和 В. К. 克拉皮文(Крапивин)副教授对作者提出了很宝贵的指正。物理数学科学博士 Л. А. 謝娜(Сена)和莫斯科灯泡厂离子管實驗室的同人就个别問題对作者的指点也是很有益的。

作者謹向帮助本書出版的所有同志致以深深的感謝。

作 者

第二卷 目录

序	vi
第一章 离子管的基本过程及它的一般规律	1
1-1. 离子管的性质及它的分类标志	1
1-2. 带电粒子、光子和气体原子相互作用的过程	4
1-3. 电荷在气体中运动的规律	14
1-4. 自持放电的伏安特性曲线	27
1-5. 自持放电的發生(着火)过程及着火电压	30
1-6. 在稳定放电光柱中的过程	39
1-7. 决定表征放电光柱中的过程的参量的实验方法	52
1-8. 放电的熄灭。消电离过程	62
第二章 充气二极管	67
2-1. 構造及作用原理	67
2-2. 充气二极管泡壳中气体或蒸汽的密度	70
2-3. 弧光放电的結構及陰極附近的現象	74
2-4. 在低压强充气二极管中的放电光柱及陽極区	83
2-5. 低电压充气二极管(番茄)中的过程	89
2-6. 充气二极管的伏安特性	93
2-7. 在电极上及在放电中的功率損耗。充气二极管的温度情况	98
(a) 陰極上的功率平衡及陰極的温度情况	98
(b) 在陽極变成热的功率及陽極的温度情况	102
(c) 管壁和气体的温度	103
2-8. 放电的着火时间	103
2-9. 弧光放电的熄灭。反电流	114
2-10. 反电流对陽極吸气的影晌及对逆弧的發展的影晌	121
2-11. 充气二极管的型式及参量	123
2-12. 充气二极管的構造	132
2-13. 保証热陰極充气管得到良好的真空性能及电性能的工艺操作	137
第三章 闸流管	140
3-1. 闸流管的結構和柵極工作原理	140
3-2. 闸流管在直流和交变陽極电压下的应用	146

3-3.	柵極的起始着火特性曲綫	151
3-4.	柵極在周期的导电期間的工作情况	159
3-5.	电弧熄灭后柵極封閉作用的恢复	164
3-6.	过渡到閘流管稳定工作情况后的着火特性的移动	176
3-7.	閘流管中的电压降及功率损耗温度情况	182
3-8.	正向电压和反向电压的極限值	187
3-9.	双柵閘流管	192
3-10.	磁控閘流管	193
3-11.	在負特性閘流管中的放电發展時間	195
3-12.	正特性的閘流管。氩閘流管	198
3-13.	閘流管的型式和参量	206
3-14.	閘流管的結構	213
第四章	汞弧管	223
4-1.	構造及作用原理	223
4-2.	蒸汽的压强和密度	229
4-3.	汞弧管中的电弧及陰極附近的过程	235
4-4.	在放电光柱中的过程的特性	241
4-5.	陽極附近的电位降落和电流密度	251
4-6.	汞弧管的伏安特性	260
4-7.	电弧的串燃	265
4-8.	当蒸汽密度不足时电弧中的过程。电弧的断裂	270
4-9.	陰極的热情况	279
4-10.	陽極的热情况	285
4-11.	凝結表面和管壳的冷却結構	288
4-12.	蒸汽受电弧加热的情況	298
4-13.	点火系統和励弧系統	300
4-14.	励弧底稳定性	306
4-15.	着火电位和电弧在陽極間的轉移	310
4-16.	借柵極控制电弧的着火時刻	314
4-17.	在引燃管中电弧的点燃	329
4-18.	汞弧管中的反电流	344
4-19.	汞弧管中的逆弧	350
4-20.	汞弧管的类型及典型功率曲綫	362
4-21.	汞弧管的構造	373
	(a)玻璃励弧管	375
	(b)抽气型金屬多陽極励弧管	378

(B)金屬可拆卸型單陽極汞弧管	382
(r)金屬無系勵弧管	386
(A)引燃管	397
4-22. 高电压汞弧管	408
4-23. 可拆卸抽气型汞弧管的真空系統	415
4-24. 真空的量測和抽气系統的自动化	424
4-25. 冷却系統	428
4-26. 汞弧管的化成和陽極的老練	434
参考書目	437

第一章 离子管的基本过程 及它的一般规律

1-1. 离子管的性质及它的分类标志

在电子管里电子是唯一的载流者：与电子管不同，在离子管里，除了电子以外（电子仍然是主要的载流者）还有正离子参加这过程（正离子就是缺少一个或数个电子的原子或分子）。在放电区里离子的作用主要地可归结为补偿电子的空间电荷，这就使得有可能在较小的管压降下通过较大的电流，从而使得器件有高的效率（见第一章，第 1-4 节）。正离子是由电子使气体（蒸汽）的原子或分子电离而产生的，这些气体（蒸汽）是在尽量抽走空气以后充到管内去的。

离子管里有时充以惰性气体（氦、氖、氩、氪、氙），有时也充以汞蒸汽。当汞从引入管内的汞滴的表面蒸发（如在热阴极器件中所遇到的）或者从汞阴极表面蒸发时管内就充满汞蒸汽。某些类型的离子管也充以氢气。

根据充气的种类可以将器件分为汞气管与充气管。

选择以上举出的气体或汞蒸汽来充到管内去是由于它们不与器件的电极和玻璃起化学反应，此外，又因为它们不形成（或很少形成）负离子。

充到管内气体或蒸汽的密度对于电流在其中通过气体的条件有决定性的影响。在气体或蒸汽密度小的情况下，电子才能有较大的自由位移，才能在上述小的管压降下，使电子积累足以使气体原子（分子）电离所必需的能量。

汞汽管通常是在压强不超过几微米及几十微米汞柱下工作。气体密度小的充气管通常在压强不超过十分之几的毫米汞柱下工作，只是在较稀少的情况下这压强才达到几个及几十毫米汞柱。低压强的离子管是属于真空器件的类型。

除了电真空型的离子管外（制造它们时必需事先在它的工作空间得到真空），做开在空气中放电的器件也有一些应用。

气体的压强是离子管分类的第一个标志。

另一个分类的标志是放电的形式。

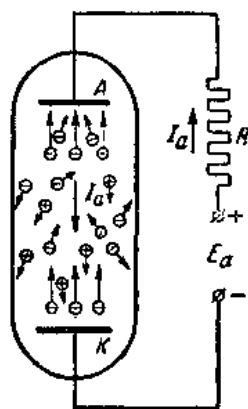


图 1-1. 在简单的直流电压电路中的离子管。

根据放电的形式我们把离子管分为两个基本的类别：a) 自持放电器件；b) 非自持放电器件。在 a) 类器件里电子是在离子的作用下从阴极发射出来的（离子是从放电区间跑向阴极的），因此电子发射所必需的能量是从放电本身所获得的。在 b) 类器件，阴极的发射是和电子管的一样，通常是倚靠外部电流源将阴极加热（热阴极器件）。在各种自持放电中特别重要的有两种：a) 辉光放电；b) 弧光放电。

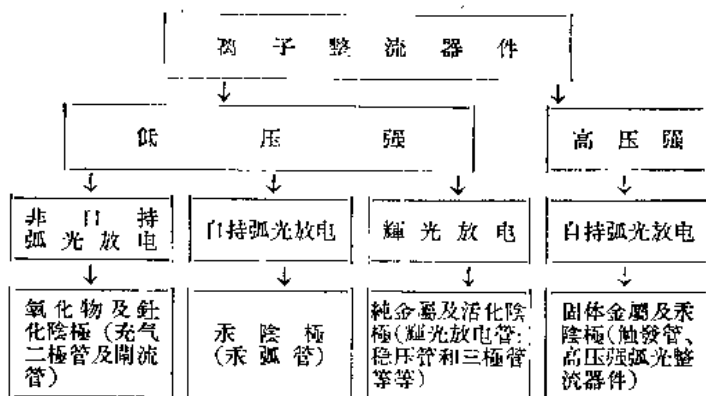
辉光放电的特征是阴极电流密度小和在阴极附近的电压降落比较大（数量级为百伏），而弧光放电则相反，它的特征是阴极电流密度大和阴极位降相当小（不超过 20—30 伏）。

非自持放电在热阴极弧光整流器件中用得最多。在这种器件中，如在电子管一样，阴极是由局外电流源加热的。

器件的阴极的类别是重要的分类标志。被采用的阴极有：a) 具有干净的表面或活化表面的固体金属做的冷阴极；b) 氧化物或钽化过的加热阴极；B) 汞阴极。

上述三个标志就是建立下列作为整流器件的离子管（即指容許电流單方向通过或优先向一方向通过的器件）的簡單分类表的基础。

离子整流器件分类表



在物理性質方面与离子整流器件相类似的还有其他型式的离子管,如气体放电的輻射源放电器,此外还有为分析物質的化学成分的分析仪(質譜仪)等等。

用作整流器件的离子管,除了基本的外还可以用一系列的补充分类标志来区别它們,如 a)管内工作陽極的数目; b)有沒有控制柵; B)管壳的材料(玻璃、金屬); r)器件的冷却系統等等。

上表所列器件的整流性質是根据以下的特性,即只有陰極能够發射电子(在正常工作情况下)。因而,如果器件接在交流电压迴路內,則只当陽極对陰極為正时,器件才容許在小的电压降落下通过大的电流。在相反的極性时管内电流(反电流)小到几可忽略。

現有的充气二極管及閘流管其电流(平均值)是在十分之几安到几十安之間,容許的反电压从几十伏到几万伏。特別型式的高压充气二極管及閘流管电压做到几十万伏。电流負載能力的極限主要是受被加热的陰極的發射性質的限制。汞陰極沒有这个对电

流的限制,因此汞弧管在容許的反电压范圍(从几百伏到 3—10 千伏)內一个管的电流可以达到几千安。高压汞弧管的电压可以是几万伏到几十万伏,但电流(平均值)通常不超过几百安。

輝光放电管是属于小功率离子管的类型。电流不超过几十毫安。这些器件主要是用作稳压管及脉冲繼电器。

到目前为止高压离子整流器件的应用还有限。虽經長期地嘗試設計高电压、大电流的高气压弧光整流器件,但至今尚未能制出寿命及效率能滿足要求的器件。

1-2. 帶电粒子、光子和气体原子 相互作用的过程

离子管中的物理現象是帶电粒子、光子(光的量子)和气体原子間相互作用(或称之为基本的相互作用)的总和。因此在全面地考虑管内过程之前先說明这些相互作用的性質和規律性。

在气体放电中最常見的粒子間的基本的相互作用是电子与气体(或蒸汽)的中性原子(或分子)相碰撞。

气体原子的状态可以用它的“能譜”来表征。这个“能譜”由原子內所有的粒子来决定,但我們感兴趣的是价电子,即組成原子外壳的电子的能量,因为下面所考虑的过程主要是由这些电子参加。

圖 1-2 画出了一个原子的某一个价电子的各种可能能級的圖。每一条綫代表电子的一个可能的能态。提高电子的能量相当于原子有較高的位能儲藏。最低的能級 W_0 对应于最稳定的原子状态,在那里可以停留無限久。这状态称为常态。当从外界傳給原子額外的能量时,电子就接受这能量,并且把它的能級提高到 W_1 、 W_2 或 W_3 等等。这些能級称为激發能級,根据量子力学的定

律氣體的原子的電子不可能有與指出的能級不一致的中間能級。在激發狀態下原子停留極短的時間（約 10^{-8} 秒）就重新過渡為常態或另一較低能級的激發狀態（某些情況例外，將述於後）。在過渡時原子用光子的形式輻射出先前得到的額外的能量。但是也存在這樣的能級，若無外因促進（如與別的粒子或管壁相碰撞）不能從該能級過渡。這些能級稱為亞穩能級。當重新與氣體的其他粒子或管壁相碰撞時，原子在亞穩狀態的居留就停止。算出的亞穩原子的平均壽命是介於 10^{-3} 到 1 秒之間。因為亞穩原子存在的期間顯著地較正常的激發原子長，這些亞穩原子在放電中起着特別的作用（將見於下）。

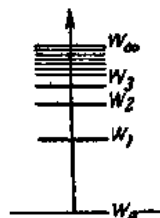


圖 1-2.
原子能級圖。

當能量超過最大可能的激發能級時，電子就與原子完全脫離關係。原子缺少了電子就變為正離子。這過程稱為原子的電離。激發及電離的過程屬於非彈性碰撞。若碰撞時粒子總動能由於內能（位能）相應的變化而變化，則這些碰撞稱為非彈性碰撞。此外還有彈性碰撞。後者理解為粒子的這樣的相互作用，即粒子部分地交換能量而它們的動能的總和保持不變。這時原子內部的狀態也是不變的。圖 1-3, a 就表示這個過程。圖的左邊指出相互作用的粒子在碰撞前的狀態，而右邊是碰撞以後的狀態。原子被虛拟地表示為原子核及沿外殼轉動的價電子的形式。

電子在碰撞前速度為 v ，而碰撞後減為 v_1 。不單只速度的大小改變它的方向也同時改變。原子的速度在彈性碰撞時增加不多。在某一定量的氣體里的原子總體的速度的提高意味著氣體溫度整個地提高。

在每次作彈性碰撞時電子給予原子的相對能量可由下面關係式來決定[參考書目 1]。

$$\kappa = \frac{2m_e}{m}(1 - \cos \theta), \quad (1-1)$$

式中 m_e 是电子的质量;

m 是原子的质量;

θ 是碰撞后电子速度方向变化的角度。

考虑到电子与原子碰撞的次数很大, 我们可以认为, 每次碰撞平均说来电子能量损失的分额等于:

$$\kappa = 2 \frac{m_e}{m}. \quad (1-2)$$

由于电子的质量远小于原子的质量, 如从表 1-1 所看到的, κ 的数值是十分小的。

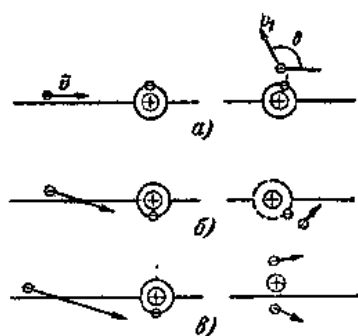


圖 1-2. 基本的相互作用圖。

表 1-1. 彈性碰撞時電子所損失的能量的份額的平均值

氣體	κ
H ₂	11.05×10^{-4}
He	2.78×10^{-4}
Ne	5.55×10^{-5}
Ar	2.78×10^{-5}
Kr	1.34×10^{-5}
Xe	8.56×10^{-6}
Hg	5.5×10^{-6}

电子和气体粒子間的彈性碰撞的規律与彈性球碰撞的規律之間的相似点是有条件的 (这些相似点是这类过程之所以称为彈性碰撞的原因), 因为电子与原子間的相互作用实际上是电动力的过程, 从本質上說所談的是电子与原子外壳电子間的相互的电磁作用。

圖 1-3, b 及 c 表示非彈性碰撞。用圖 1-3, b 來說明激發过程。用增大的軌道 (圖上用虛綫画的圓) 来虚拟地表示过渡到激發状态的原子。用圖 1-3, c 來說明气体原子电离的过程。由于电离

的结果,除了原始电子,还出现了正离子及第二个电子。

为了发生激发与电离,电子应具有某一最小的能量。为了激发原子所必需的能量称为激发能。这能量通常是以电子伏特计算,或者简单地把它看作“伏特”而称之为激发电位 U_s , 因为这能量是属于一个电子的。一个电子直接电离一个常态原子所必需的最小能量称为电离电位 U_i 。

表 1-2 列出了一系列我们感兴趣的气体的电离电位及激发电位的数值。这些数值指出: 电子应该在电场中经过多大的电位差才能在碰撞时激发或电离未激发的原子。

激发原子的位能比中性原子的位能高出的数值为激

发电位 U_s , 而电离所形成的离子的位能比中性原子的位能高出的数值为电离电位 U_i 。

原子的能级改变时所产生的辐射的波长决定于原子的开始及最终的能态。当原子从激发状态直接过渡到常态时所产生的辐射称为谐振辐射。在发生谐振辐射时, 从一个原子辐射的能量子(光子)可以激发另一个原子。非谐振辐射时这种激发是不可能的, 这就是两种辐射的区别。谐振辐射提高了放电中激发原子的浓度。表 1-2 除了列出对应于谐振能级的激发电位 U_s 外还列出了最小的亚稳激发电位 U_m 。亚稳原子再碰撞时它将过渡到常态或被电离决定于这些亚稳原子是失去或者得到能量。放电中亚稳原子的存在, 正如同有显著的谐振激发原子浓度一样, 具有实际的意义, 因为这时原子电离的几率可以得到二级或几级的提高(累积电

表 1-2. 最小的亚稳激发电位 U_m , 谐振激发电位 U_s 及电离电位 U_i (伏特)

气 体	U_m	U_s	U_i
H ₂	—	11.1	15.4
He	19.72	20.80	24.5
Ne	16.57	16.62	21.5
Ar	11.49	11.56	15.7
Kr	9.86	9.98	14.0
Xe	8.28	8.39	12.1
Hg	4.66	4.86	10.4

离)。累积电离时,参与电离过程的电子的平均能量降低了。降低的程度决定于累积电离的次数与直接电离的次数之间的比例。为了从数值上表示当两种形式的电离存在时电子的平均能量,时常引入有效电离电位 U_i 的概念。这有效电离电位的数值是在亚稳激发电位 U_{st} 与电离电位 U_i 之间。

在分子性的气体放电中,还可能有另一种的激发形式,它的特征是分子中电子的振动能的改变。

当定量地考虑电子与气体原子相互作用的数目时,常利用平均自由路程(决定电子在重新碰撞之间所走的平均路程) λ_e 或 λ_e 的倒数,这倒数称作有效截面,后者指示出一个电子在 1 厘米的路程中平均所发生的相互作用的数目。

全(或总)有效截面 Q_e (决定电子在 1 厘米路程中与气体原子相互作用的总数)可用下式求出

$$Q_e = \frac{1}{\lambda_e} = \frac{1}{4\sqrt{2}\lambda_{st}}, \quad (1-3)$$

式中 λ_{st} 为热运动下气体原子的平均自由路程。

原子的平均自由路程 λ_{st} 可从单位体积中的分子浓度 n 和原子半径 a (认为原子所占的体积为球形)按已知的气体运动论的公式求得

$$\lambda_{st} = \frac{1}{\pi a^2 n} = \frac{1}{qn}, \quad (1-4)$$

式中 $q = \pi a^2$ 是气体原子(或分子)的截面。

单位体积中的粒子浓度 n 与压强 p 的关系为

$$n = \frac{p}{kT}, \quad (1-5)$$

式中 k 是波尔兹曼常数 $= 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/度,从(1-4)及(1-5),我们得到了计算原子的平均自由路程的式子

$$\lambda_{st} = \frac{k}{q} \cdot \frac{T}{p}. \quad (1-6)$$