

51
高等学校交流讲义



真 空 技 术

ZHENKONG JISHU

戴 浩 編

人 民 教 育 出 版 社

0725/55

真 空 技 术

戴 浩 編

人民教育出版社出版 高等学校教学用书编辑组
北京宣武门内承恩祥了号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第2号)

京 华 印 书 局 印 刷

新华书店科技发行所发行

各 地 新 华 书 店 經 售

统一书号 13010·1029 开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $13^{8/16}$

字数 340,000 印数 0001—4,500 定价(5) 1.30

1961年9月第1版 1961年9月北京第1次印刷

目 录

緒論.....	1
第一章 真空技术的物理基础.....	9
§ 1-1 气体分子运动論的基本原理.....	9
§ 1-2 麦克斯韦速度分配定律.....	12
§ 1-3 最可几速率、平均速率及均方根速率.....	17
§ 1-4 碰撞次数.....	24
§ 1-5 自由程长度.....	31
§ 1-6 自由程长度的分配規律.....	34
§ 1-7 与容器器壁碰撞的分子数·余弦定律.....	38
§ 1-8 迁移方程.....	43
§ 1-9 气体的热傳导.....	46
§ 1-10 气体中的內摩擦.....	53
§ 1-11 气体的扩散.....	58
§ 1-12 滑動現象.....	66
§ 1-13 温度剧增現象.....	71
§ 1-14 低压气体的热傳导.....	76
§ 1-15 热流逸現象.....	78
§ 1-16 热輻射現象.....	81
§ 1-17 在高压强下气体沿导管的流动.....	82
§ 1-18 在低压强下气体沿导管的流动.....	89
§ 1-19 导管的流阻与流导.....	98
第二章 真空的測量.....	100
§ 2-1 概述.....	100
§ 2-2 U形真空計.....	102
§ 2-3 静态变形真空計.....	106
§ 2-4 压缩真空計(麦氏真空計).....	106
§ 2-5 热真空計.....	119
§ 2-6 热阴极电离真空計.....	131
§ 2-7 磁控放电真空計.....	141
§ 2-8 放射性电离真空計.....	144
§ 2-9 气体放电真空指示器.....	147
§ 2-10 其他真空計.....	148

§ 2-11 封闭电容器中真空度的测定	152
第三章 真空的获得	154
§ 3-1 概述	154
§ 3-2 真空抽气机的参量	156
§ 3-3 测量抽气速率的方法	160
§ 3-4 活塞抽气机	165
§ 3-5 油封旋转抽气机	168
§ 3-6 分子抽气机	192
§ 3-7 双转子容积分子抽气机(罗茨泵)	195
§ 3-8 蒸汽流抽气机	197
§ 3-9 固体的吸气与放气	228
§ 3-10 气体的吸附与吸收	229
§ 3-11 促进固体吸气的因素	237
§ 3-12 真空技术中所应用的材料与主要气体的相互作用	238
§ 3-13 吸气剂	241
§ 3-14 捕集器(阱)	247
§ 3-15 用加热法去气	257
第四章 真空系统的检漏法	262
§ 4-1 概述	262
§ 4-2 检漏法·检漏器	265
§ 4-3 漏气量的确定·标准漏孔	281
第五章 真空系统和真空设备	284
§ 5-1 对真空系统的基本要求	284
§ 5-2 真空系统的主要材料	284
§ 5-3 真空系统的连接方法	290
§ 5-4 真空系统的零件	306
§ 5-5 真空密封物质	312
§ 5-6 真空系统的各种形式	315
§ 5-7 真空系统的安装、调试、运用和维护	328
§ 5-8 真空系统的计算和设计	333
第六章 超高真空技术	374
§ 6-1 概述	374
§ 6-2 超高真空的测量	376
§ 6-3 超高真空的获得	391
§ 6-4 超高真空系统	410
附录	420

1 国外机械旋轉真空泵规范簡明表.....	420
2 喷射油汽抽气机与輔助抽气机的特性.....	421
3 国外蒸汽流泵规范簡明表(苏联产品).....	422
4 蒸汽流泵用的几种油的性质.....	424

緒 論

一、“真空”的概念及“真空技术”的基本內容

所謂“真空”系指低于一个大气压的气体状态。“真空”这种气体的特殊状态的主要特点是：与大气状态比起来，单位体积中气体分子的数目較少了；气体中質点間（气体分子之間或是其他質点与气体分子之間）的相互碰撞不那么頻繁了；打到某一表面（例如器壁）上的气体分子数目亦較少了。

“真空”的这种特点，被广泛利用于科学研究、工业生产的各个领域，以达到各种特定的目的。例如，在电子器件中为了能够精确控制电子流，电子与殘余气体分子的任何碰撞都是不希望有的，因此一般的电子器件总是要将其内部压强抽到 10^{-6} 毫米汞柱以下；这样低的压强同时保证了打到器件中灵敏的活性表面（如光电阴极表面、热阴极表面等）上的分子数目足够少，使它們得以能够长期有效地工作。在加速器中，为了保证所研究的質点不因与殘余气体分子碰撞而損失掉，亦必須抽到 10^{-6} 毫米汞柱以下的压强。

化学工业中的真空蒸餾，冶金工业中的真空熔炼，光学仪器制造业中的真空蒸发，制葯工业中的真空脫水，电机工业中的真空浸漬等等都是与这些特点之利用有关的例子。

真空技术的基本內容，就是在这种各色各样的应用过程中逐渐形成的。在目前，真空技术已經发展成为一門独立的科学技术，可以認為它是由下列一些相互有联系的各环节組成：真空的获得，真空的測量，檢漏，真空系統的設計及計算等。自然，随着今后应用的愈来愈广泛以及对它本身研究工作的愈来愈深入。真空技术的内容亦将愈来愈丰富，愈来愈完善起来。

二、真空技术发展簡史

在早期,对“真空”的研究以及真空技术的应用只是个別学者于實驗室中的事。只有在白熾灯泡发明(1873年)以及后来各式各样电子管的发明及大量应用以后,只有在这种与工业生产发生了緊密的联系以后,真空技术才获得迅速发展的可能。

在白熾灯泡发明以前,主要用以获得真空的抽气机是活塞式抽气机,它只能抽到 0.25 毫米汞柱的低压。白熾灯泡发明之后,工业上的需要促进了抽气技术的发展。各种新原理的抽气机相繼出現:旋轉水銀抽气机(1905年),油封旋轉抽气机(1907年),分子抽气机(1913年),扩散抽气机(1915年)。扩散抽气机的发明使真空技术跨入了所謂高真空(10^{-6} 毫米汞柱左右)的阶段,于是制造性能可靠的电真空器件所需要的高真空得以实现。这对电真空技术的发展,自然是很重要的。抽气技术发展的第二个重要阶段是与近代尖端科学研究的需要分不开的。加速器、热核反应装置,均需要在大容积的空間中建立尽可能高的真空。因此近 10 余年来在抽气速率的增大以及真空度的提高方面均大有进展。抽速高达数万升/秒的扩散抽气机已并不罕見。新原理的利用(各种电离抽气机)使在真空度方面跨入了所謂超高真空(目前已能达到 10^{-12} 毫米汞柱)的阶段。目前超高真空技术已日益广泛地应用起来。

吸气剂的利用是获得及保持真空的一个重要环节。最早的吸气剂是紅磷,早在 19 世紀末期它就已广泛应用于白熾灯泡的制造中。近代电真空器件采用的吸气材料主要是鋇,此外还有鎂、鋁、鉬、鈳、鈦、鈷等等。值得特別指出的是利用吸气材料来制造連續工作的抽气机取得了巨大的成就,所謂“吸气剂-离子泵”就是綜合了吸气剂及电离抽气机的作用而制成的;其中的一种类型-鈦泵,是目前获得超高真空的主要工具。

在真空測量方面,发展的过程大致如下:早在 1873、1874 年,热輻

射真空計、壓縮真空計就分別制成。后来各种与压强有关的現象被利用起来,先后制成粘滯真空計(1906年)、热真空計(1906年)、电离真空計(1916年)、磁控放电真空計(1937年)、放射性电离真空計(1946年)。这些真空計由于工作原理的不同,其性能亦各有长短,但它們所能测量的最低压强极限均不能低于 10^{-8} 毫米汞柱。測量低于 10^{-8} 毫米汞柱的电离真空計是1948年以后出現的。目前,測量超高真空的真空計較成功的有超高真空电离計、磁控管式真空計、倒置式磁控管真空計等。

我們不可能在这里将真空技术所有的发展过程都罗列出来,但是應該指出:除了真空的获得、真空的測量之外,檢漏技术、真空系統的設計及計算等問題亦日益重要起来。各种类型的質譜仪(磁質譜仪、离子諧振質譜仪、射頻質譜仪等)正在被使用及改善中,这种設備早先由于其复杂、昂貴,其应用只仅仅限于實驗室中;而在現代,一方面由于对檢漏技术直接提出了更高的要求,一方面由于整个工业技术水平的提高,用于檢漏的質譜仪已做成工业成品在成批生产。由于近代科学研究的需要,常常要在大容积的空間中(其尺寸常以米計)建立起高真空甚至超高真空状态,因此如何科学地設計大型的真空系統这一問題自然就被提到日程上来。

在我国,解放以前,只有一些簡陋的灯泡制造电真空事业,处于非常落后的状态;真空技术的应用更是罕見的事。虽然个别学者的研究成果是很出色的,但就我国整个水平來說,还是落后的。

新中国成立后,正如所有的科学技术一样,电真空事业以及真空技术均得到蓬勃的发展。現在,我国已建立起近代化电真空企业,在这些企业中,真空技术被广泛地应用着。在真空設備的生产方面,無論在質量上、数量上均在日益提高。

三、真空技术对电真空器件的重要性

真空技术与电真空工业有特別緊密的联系。实际上,真空技术是

伴隨着電真空工業興起的，而整個電真空工業則幾乎到處都滲透着真空技術的問題。

這些聯系表現在各種各樣的情況。首先，所有電子器件的製造均必須經過“抽空”（抽到足夠的真空度）這一重要步驟（離子器件亦要先抽走空氣再充以“工作氣體”）。這就要直接應用到真空技術所有的基本環節（獲得、測量、檢漏）。然而僅僅是“抽空”還是不夠的；只有這種“真空”能夠在器件內部長期地保持住，器件才能有穩定的特性及足夠的壽命。任何真空度的變壞，將會嚴重地影響器件的特性及縮短器件的壽命。

真空度不佳，將會改變器件的特性：一般收訊放大管中殘余氣體過多，將引致電參量的改變、柵流增大、特性“蠕動”、噪音增大等毛病；如果是高壓電子器件，如高壓整流管、X射綫管、強功率管等，則真空度稍差一些，即會引起電击穿。

真空度不佳，更會縮短器件的壽命：由於這種過程是“累積”的，故這種影響就更易於看出來。例如白熾燈泡中如含有少量殘余的水汽，就會引致燈泡發黑，鎢絲過早燒斷等。收訊電子管的“心臟”——陰極，一般是採用所謂氧化物陰極，它是由一種對於氣體非常敏感的半導體材料——氧化鋇——制成，少量氣體即能使它“中毒”而喪失其電子發射能力，引致整個電子管壽命的終結。

總之，真空度不佳時，對電子器件（在離子器件、相應的是“工作氣體”不純或其純度不能長期保持）的影響是各色各樣的，上面只不過舉一些簡單的例子而已。

由此可見，電真空事業對真空技術的要求主要在二個方面：將器件內部的气体抽走及長期保持住這種“真空”狀態。

抽走器件內部的气体只是器件製造過程中的一道工序，但要在器件內部保持住這種“真空”，那就必須在製造的所有過程中採取相應的措施，以保證內部的零件不在使用時放出氣體來。這樣，真空技術就必

然滲透在電真空器件製造的所有環節中了。

首先,從原材料、零件的製造開始,就要遇到真空技術的問題。例如無氧銅的冶煉、各種吸氣材料的製造、某些材料及零件(如石墨電極)的預先除氣,均是在真空設備中進行。有些材料、零件(如吸氣劑)甚至需要儲藏在真空容器或真空設備中,以免在裝配到器件之前吸收大量的氣體。

各零件裝配(所謂裝架)好並將管泡封好(所謂封口)之後,器件即進行最重要的一道加工工序,即所謂排氣。這一工序亦不僅僅是抽空並熔封下來(所謂封排氣管)的問題;實際上由於此時器件在不斷抽氣很多“真空加工”過程均集中於此一道進行。如器件中的空氣抽掉後,即可進行玻泡除氣(用烘箱烘)、零件除氣(用高頻感應加熱、電子轟擊等)等,常常有很多關鍵性的加工過程如氧化物陰極的分解、光電表面的形成等等,亦在此時完成。在所有這些情況下,不但要求有足夠的真空度,同時還要求足夠的抽氣速率,以抽走加工過程中可能放出的大量氣體。

總之,電真空器件的生產過程處處滲透着真空技術的問題。在真空技術問題未能順利解決時,常常甚至影響了電真空器件的正常生產。

四、真空測量的單位及真空區域的劃分

1. 真空測量的單位 真空度的高低直接用氣體壓強的大小來表示。壓強越低,表示的真空度就越高;反之,壓強越高,真空度就是越低。現舉常用壓強單位於下:

(1) 在CGS制中壓強單位為[巴]。1巴=1達因/厘米²。主要用於理論工作中。

(2) 物理大氣壓(ATM)

$$1\text{ATM}=76\times 13.595\times 980.67\text{巴}=1.01325\times 10^6\text{巴}$$

(3) 在真空技術中最常用的壓強單位是毫米汞柱(mmHg)。

$$1\text{mm Hg} = \frac{1.01325 \times 10^6}{760} \text{巴} = 1333.22 \text{巴}$$

欧洲各国多用“托”(Torr)来作单位。

$$1\text{Torr} = 1\text{mm Hg}$$

今后为了书写方便,毫米汞柱一律以 mm Hg 表示。

(4) 当压强很低时,也有用微米汞柱来表示的。

$$1\mu\text{Hg} = 10^{-3}\text{mm Hg}$$

$$(5) \text{真空百分数} = \frac{760 - P\text{mmHg}}{760} \times 100\%$$

其中 $P\text{mmHg}$ 是气体的压强,以 mmHg 计。

当 $p < 1\text{mm Hg}$ 时,这种表示即不适用。

2. 真空区域的划分。

在只需粗略地指出真空度的大致情况时,采用真空区域的概念是很方便的。

真空区域的划分,以下述方法最为理想、最为自然。将该压强下的气体分子平均自由程长度(λ)与容器的主要尺寸(d)来比较。所谓主要尺寸,指的是与物理现象的进行关系最密切的那一尺寸。

这样,真空区域即视 $\frac{\lambda}{d}$ 值是小于、等于或大于 1 而定。

$$\frac{\lambda}{d} < 1 \quad \text{低真空}$$

$$\frac{\lambda}{d} \approx 1 \quad \text{中等真空}$$

$$\frac{\lambda}{d} > 1 \quad \text{高真空}$$

对于一般电真空器件,通常可以认为 $d = 1$ 厘米;而对于空气, λ 值在 10^{-2}mm Hg 时约为 1 厘米,故

$$\frac{\lambda}{d} \approx 1 \text{ 即相当于 } 10^{-2}\text{mm Hg} \text{ 的压强。}$$

大于 10^{-2} mm Hg 的压强, 即称为低真空。

而认为 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ mm Hg}$ 的压强为中等真空。

10^{-4} mm Hg 以上至 10^{-8} mm Hg , 称为高真空。

高真空区域之所以由 10^{-4} mm Hg 开始, 是基于对这一区域有较严格要求的考虑。

而 10^{-8} mm Hg 以后, 则称为超高真空。

以 $\frac{\lambda}{d}$ 比值为真空区域划分的标准, 是有其深刻的物理根据的。原来, 平均自由程长度是气体分子相互碰撞后所走过的平均路程, 而容器尺寸则是允许气体分子(或其它质点)活动的实在路程, 这二者比值的大小显然反映出这一事实: 对所进行的物理现象起决定作用的是分子间的相互碰撞呢? 还是分子与器壁间的碰撞? 依据这种划分, 在低真空区域, 前者是主要的; 在高真空区域, 则后者是主要的。

这种划分标准在实际工作中亦恰好是最方便的。获得及测量真空的工具以及相应的一整套有关技术, 几乎亦是以低真空、高真空及超高真空定型下来的。

低真空——机械抽气机, 热真空计, 低真空阀门等。

高真空——机械抽气机-扩散抽气机组, 电离真空计, 磁控放电真空计, 高真空阀门等。

超高真空——机械抽气机——(扩散抽气机)——超高真空抽气机组, 超高真空电离计, 倒置式磁控管真空计, 超高真空阀门等。

一般电真空器件的真空度如下:

白炽灯泡: $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ mm Hg}$

收音电子管: $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ mm Hg}$

高压电子管(强功率管、X射线管等):

10^{-7} mm Hg

电子束管: 10^{-7} mm Hg

一般电真空器件的生产、科学研究工作中基本的真空技术属于高

真空这一区域中。目前正在发展中的超高真空技术显然对电真空事业的意义亦将愈来愈大。从事电真空事业的人员对这方面的发展肩负着一定的责任。

五、本課的目的与要求

在本課中，将系統地讲授与电真空专业有关的所有真空技术各主要环节。首先将由作为整門課程理論基础的“真空技术物理基础”一章开始，接着是“真空的获得”、“真空的測量”、“真空檢漏”三大环节的詳細討論。在这基础上由“真空系統及真空設備”一章将所有这些环节綜合起来。最后一章介紹新成就——超高真空技术。

要掌握真空技术，除了掌握有关基础理論，了解各种工具、方法的原理、构造、特性等外，还要通过实验这一环节，熟悉某些基本操作及有关的实际問題。只有这样才能对真空技术建立起正确的認識，才能談得上应用真空技术来解决电真空专业生产上和科学研究上的問題。

第一章 真空技术的物理基础

§ 1-1 气体分子运动论的基本原理

物质存在的各种状态中最简单的是气态。气态的特点是：一定质量的气态物质（即气体），既无一定的形状，亦无一定的体积；气体能无限制地膨胀而完全充满于任何体积的容器中。

气体又能均匀地混合。数种不同种类的气体，不管其比例如何，都能混合成一均匀状态。

正是由于其简单性，使得对于气态的实验研究很早就取得了可靠的结果；相应的定律亦较早建立起来。其中较重要的有下列一些定律，称为气体的基本定律。

1. 波义耳定律：在恒定温度下，一定量气体的体积 V 和其压强 p 成反比：

$$V = K/p \text{ 或 } pV = K \quad (1-1)$$

式中 K 为与温度有关的常数。

2. 盖·吕萨克定律：

①在压强不变下，温度升高一度，气体体积的增加对原体积之比是相同的。

$$\frac{V_T - V_0}{V_0 T} = \alpha_p$$

即 $V_T = V_0(1 + \alpha_p T)$ (1-2)

在上式中， V_T 和 V_0 是气体在温度 $T^\circ\text{C}$ 和 0°C 时的体积， α_p 是在恒压下，温度增加一度时，气体体积增加的分数的，叫做膨胀系数。

②在体积不变下，温度升高一度，各气体压强的增加对原来压强之

比是相同的。仿上可引出:

$$p_T = p_0(1 + \alpha_V T) \quad (1-3)$$

在上式中, p_T 和 p_0 是气体在温度 $T^\circ\text{C}$ 和 0°C 时的压强, α_V 是压强系数。

利用波义耳定律, 可以证明 $\alpha_p = \alpha_V$ 。故今后 α_p 与 α_V 可以不必区别而用同一符号 α 表示。

3. 亚佛加德罗定律: 等体积的任何种类的气体, 在同温度和同压强下均有相同的分子数。

4. 气体状态方程: 利用上面三个定律可以证明气体的体积、压强和温度间有下面的关系:

$$pV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1-4)$$

式中 M 为气体的质量, μ 为其分子量, T 为绝对温度, R 为气体的普适常数。这方程式称为理想气体的状态方程。

5. 道尔顿分压定律: 混合气体的总压强等于各个别气体的分压强之和。所谓分压强乃指各个别气体单独存在而且占有混合气体的原有体积时所具有的压强; 若以 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 代表气体 1、2、 $\dots$ n 的分压强, p 代表混合气体的总压强, 则有

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (1-5)$$

上面叙述的几条定律是关于气体大量实验的总结。这些经验定律之间是否有任何内在联系呢? 为了发现这种内在联系, 以及为了解释有关气体的各种现象, 提出了气体分子运动论的理论, 它的基本内容是:

1. 任何气体均由大量作无规则运动的微小质点所组成; 在同一种气体中, 这些质点是完全一样的, 这些质点称为分子。

2. 气体分子具有一定的体积, 因此它们在运动时互相不断的碰撞, 且亦与容器内壁不断地碰撞。这些碰撞是完全弹性的。

上面的基本内容原来本是一些假定，但它們能很好地解釋有关气体的各种現象及經驗定律；更主要的是由它們出发所作出的种种推論均与实际情况相符合，故它們的正确性是肯定的。这些假定已經成为理論。

例如，气体对容器內壁产生的压力实际上就是分子碰撞內壁的結果。压力的大小可根据分子运动論理論計算出来；波义耳定律，盖·呂薩克定律，亞佛加德罗定律，道尔頓分压定律以及理想气体的状态方程等均可同样由分子运动論推导出来。

为了对气体分子有一些概念，我們举一些数据如下：

每立方厘米中的分子数(标准状态下)： 2.69×10^{19} 个。

分子直徑： 2×10^{-8} 厘米左右。

分子的质量(氫气)： 3.34×10^{-24} 克。

上面所提到的气体基本定律，在当年曾被認為是完全符合于实际气体的；但后来在較大的温度及压强范围中进行精确实验的結果，发现它們与实际气体的性质不尽符合。只有在較高温度及較低压强时，它們才較正确。因此所有实际气体只有在較高温度及較低压强时才符合这些定律；凡是符合波义耳，盖·呂薩克及亞佛加德罗定律的气体称为理想气体。

低压气体与理想气体很接近，因此在真空技术中，几乎所有的情况均可以应用理想气体的定律而不必加任何修正。

从分子运动論的观点來說，理想气体相当于下面二个条件：

1. 气体分子本身的实际体积和整个气体体积相比是微不足道的；可以将分子看成几何点。

2. 分子之間沒有相互的作用力(吸力或斥力)；除了互相碰撞外每个分子的运动有其完全独立性，不受其他分子的影响。

上面討論的主要是关于气体的問題，如果是蒸汽，情况又会怎样呢？

首先,我們要弄清楚蒸汽的概念。如所周知,当气态物質温度高于临界温度时,只靠压缩不能使其液化,此时即称之为气体;如低于临界温度,則压缩能使之液化,即称为蒸汽。

通常以室温(15°C — 25°C)为标准,来确定气态物質是属于上面的哪一种。象氮、氖、氧、氩、氦等,它們的临界温度均比室温为低,即称之为“永久”气体;而水蒸汽、汞蒸汽等,其临界温度比室温为高,(水汽为 365°C ,汞蒸汽为 1450°C),故称为蒸汽。

至于理想气体的定律对于蒸汽是否适用呢?处在饱和状态下的蒸汽,其蒸汽压只与温度有关,而与体积没有关系,故波义耳定律等即不适用;如果蒸汽处于非饱和状态时,則理想气体的定律是适用的,尤其是蒸汽的密度(或压强)不大时更是正确。真空技术中常用的各种工作液体如水銀、真空油(在室温下其饱和蒸汽压分别为 10^{-3}mm Hg 、 10^{-7}mm Hg 左右)等的蒸汽完全可以应用理想气体定律。

§ 1-2 麦克斯韦速度分配定律

气体的最基本特性是它能填满任何大小的容器。設有一定量的气体置于容积 V_1 中,并且已經达到了稳定状态(即不随時間而变化的状态);如果 V_1 增大到 V_2 ,則气体的体积将扩张,过了一定時間后, V_2 中将建立起新的平衡状态。

凭經驗知道,在平衡状态下气体在容器中是均匀分布的,并且分子运动的方向也是均匀分布的,即沿空間各个方向运动的分子数目是一样的,沿某一方向的分子数并不比沿另一方向的为多;否則,沿某一方向运动的分子数目特别多,則将引起气体往某一方向的流动,而这是与观察到的經驗事实不相符合的。

在稳定状态下,分子在空間的分布是均匀的;分子速度沿空間各方向的分布亦是均匀的;这就是所謂分子混乱性的假設。

混乱性是气体本身內在的特性,它是具有某种“独立性”的。如果