

KONG QI TIAO
JIE ZHUANG ZHI

空气调节装置

计算和设计基础

五机部第五设计研究院

北京

试验所

空 气 调 节 装 置

计 算 和 设 计 基 础

[苏]O. Я. 科果林 著

孟 昭 提 等 译

前 言

空气与水的 热质交换 问题是空气处理过程的基本理论，是空调装置的设计基础。作者在叙述了空气与水的 热质交换 的一般理论后，用相似理论分析了各种实际空气处理过程及刘依斯比例的适用范围，提出了刘依斯比例只适用于某些空气处理过程的观点。在综合大量试验基础上，作者比较系统地叙述了空调装置的设计原则，提供了各种空气处理设备（喷水室、淋水层、表面式换热器）的设计计算方法及其最新研究成果。并且对热管换热器及间接蒸发冷却器的试验研究和应用也予以相当重视。本书还分章叙述了空调系统各种常用设备的选择计算方法和苏联近年来所生产的新设备。

总之，本书基本上反映了苏联在空调装置设计理论和设备制造方面的现有水平，对我们有一定参考价值。

参加本书翻译的有孟昭提、柴振荣、武淑琳、施文华、丁文涛。校对的有何湘、段作亭、李荣显等同志。文中有不切之处请指正。

五机部第五设计研究院情报组

1980.12.

目 录

引 言	(1)
第一章 空调装置中热质交换过程的特点	(6)
§ 1.1 湿空气热力学	(6)
§ 1.2 热质交换过程的基本方程式	(11)
§ 1.3 空气与水直接接触的热质交换过程的特点	(14)
§ 1.4 表面式换热器热质交换过程的特性	(33)
§ 1.5 用初始位势差利用系数和传热单元数指数 评定热交换过程	(39)
第二章 空气与水直接接触式设备的计算和设计基础	(44)
§ 2.1 喷水室	(44)
§ 2.2 淋水层	(59)
第三章 表面式热交换器计算与设计基础	(88)
§ 3.1 多管肋片式热交换器	(88)
§ 3.2 空气—空气热交换器	(111)
§ 3.3 热管式热交换器 (TT)	(113)
§ 3.4 间接蒸发冷却热交换器	(122)
第四章 空调装置配套设备的选择和设计基础	(135)
§ 4.1 通风机	(135)
§ 4.2 空气过滤器	(144)
§ 4.3 制冷机	(158)
第五章 以 KT 空调机单元为基础的集中式空调装置的 计算和设计原理	(171)
§ 5.1 集中卧式 KT 空调机单元	(171)

§ 5.2 集中卧式 KT 空调机.....	(185)
§ 5.3 用低温热水代替一次空气加热器的集中卧式 KT 空调机.....	(200)
§ 5.4 两段蒸发冷却单独系统的集中卧式空调机.....	(204)
第六章 局部非独立式空调器机组的计算法和结构特性...	(211)
§ 6.1 非独立式空调器机组.....	(211)
§ 6.2 悬挂非独立式空调器.....	(217)
§ 6.3 局部非独立式诱导空调器.....	(223)
第七章 蒸发式独立和局部空调机的结构特点与计算方法	(250)
§ 7.1 水冷式通用独立空调机.....	(250)
§ 7.2 风冷式独立空调机.....	(257)
§ 7.3 双级蒸发冷却式局部空调机.....	(260)
文献目录.....	(265)

引 言

所谓空气调节指的是创造和自动保持房间或构筑物内空气介质的必要条件。空气条件的概念一般包括下列空气参数：温度、湿度、流速、清洁度、气味含量、压力、气体及离子成份。要根据所服务对象的用途，来选择对使用的具体条件最为重要的空气参数。一般工业及民用建筑项目所需的空气介质通常只要具备上述一部分参数即可。

空气调节用专门的系统来实现。所谓空调系统是指为在建筑物房间内创造和自动保持空气介质参数给定值所采用的一整套设备。这一整套设备包括下列六部分：1) 空调装置，按温湿度、清洁度、气体成份及气味等要求来提供所需空气介质；2) 自动控制调节装置，对空气调节系统中所需参数的空气的处理进行控制和调节，同时使房间或构筑物内的空气参数给定值保持恒定；3) 输送和分配空气的设备；4) 输送和排出室内剩余空气的设备；5) 消音装置，消除空调系统运转产生的噪音；6) 空调系统运行所需能源（电能、冷媒和热媒）的制备及输送设备。空调系统的组成可以根据具体情况有所增减。

空调系统可按下列五个方面进行分类：用途、与所服务房间的连接方式、供冷方法、空调装置内空气处理方式，以及风机所产生的压力大小。

按用途，空调系统分成三类：工艺性空调、工艺—舒适性空调和舒适性空调。

工艺性空调系统的特点是：为工艺生产过程的进行供给和保持最适宜的空气介质，创造产品及物料试验的特殊条件，保证生物媒

介物培养及试验的人工气候，供给最适宜于制品及物料保存的气候介质。空气介质参数值的选择仅从工艺过程用途出发，不考虑空气介质对人体的影响。这类空调系统服务的对象有密闭室、工艺设备运转间、库房等。维护人员仅在空调室内作短暂停留，并戴防护用具，不受周围介质的影响。

例如，毛皮贮存室内必须使空气温度保持 $4-10^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 55—65%，以保证毛皮质量完好。奶制品厂的奶酪成熟室内，为了确保奶酪高质量，环境空气温度应为 $10-12^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不超过 75—80%。工艺空调可防止奶酪发霉，减少其干料损失，缩短结皮时间和降低手工劳动消耗。维护人员在这种房间内作短暂停留，并穿防寒衣服。

工艺—舒适性空调系统的特点是供给和保持既适宜于工艺生产过程进行、又使维护人员感到相当舒适的空气介质。空气介质的参数值要根据生产过程的要求来选定。生产过程的要求一般与室外气象条件无关。维护人员经常在这些房间内停留。例如，精密机械制造车间，为了保证零件加工和成品装配所需精度，空气必须保持恒温 $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度 45—50%。空调能减少废品率，提高劳动生产率。

舒适性空调系统的特点是供给保证人们劳动和休息所需要最有利的室内空气介质。人的劳动能力及自我感觉在很大程度上决定于其机体的热平衡。周围空气介质使人感到温暖舒适时，人的劳动能力最高，自我感觉最佳。采用空调系统能提高劳动生产率，减轻疲劳程度，使工人少生病。所以，特别在室外温度高的地区采用空调系统，在经济上最为合理。多层建筑物围护结构的开窗率高（60—75%），必须采用空调系统使室内空气介质符合正常保健卫生标准。

经验证明，在苏联南方，住宅采用空调系统能改善休息条件，促使精力迅速恢复，保持人体健康，改善自我感觉。显然，居住建筑物的空调所要走的道路是大量使用体积小、噪音低的生活用空调

机，这种空调机苏联工业部门正在试制。

按与服务房间的连接方式空调系统可分成三类：集中式、局部式和集中—局部式。集中式空调系统的特点是空调装置的位置距所服务的房间远，送风管相当长。局部式空调系统的特点是空调装置布置在所服务的房间内或直接靠近房间，无送风管（或送风管很短）。集中—局部式空调系统的特点是既有距所服务房间远的空调装置，又有布置在房间内或直接靠近房间的局部式空调装置。

按供冷方式，空调系统可分为三类：非独立式、独立式和蒸发式。非独立式的特点是用冷冻站作为集中式供冷源，用泵将冷水或盐水送至空调装置。独立式的特点是空调装置内备有各式制冷机来作为冷源。蒸发式的特点是利用水的蒸发效应来冷却空调用的空气。

按空气处理系统，空调装置可分为两类：直流式及循环式。前者仅处理室外空气，后者处理室外空气与循环空气的混合空气或者（在工艺系统内）只处理循环空气（例如香肠干燥器内的空气处理系统）。

按风机所产生的压力值 H ，空调装置可分为低压式（ $H < 100$ 公斤力/米²）、中压式（ $100 \leq H \leq 300$ 公斤力/米²）和高压式（ $H > 300$ 公斤力/米²）。

从历史上看，工艺性空调首先得到最大的发展。苏联早在三十年代就在纺织厂和卷烟厂采用了最简单的空气处理装置（喷水室及散热器）。纺织物料的强度及韧性与湿度有很大关系，所以送风加湿和局部再加湿能使工艺过程得到改善。在烟草加工工业中，生产烟制品用的湿烟草质量及损耗量在很大程度上取决于周围空气湿度。

较完善的空调装置是后来才生产的，但五十年代以前空调装置由安装单位按单体设计直接在施工现场制造。这就决定了设备的高成本和低质量，这当然不能满足国民经济对空调机不断增长的需要和施工工业化的要求。苏联机械制造的新部门——空调机制制造业，可以认为是在 1956—1957 年开始建立的，当时风量 10,000, 20,000, 40,000 和 60,000 米³/小时的集中卧式空调机及风量 500—3,500 米³/小时局部空调机组的单元就是卫生工程科学院研究、哈尔科夫

暖通设备厂（现取名哈尔科夫空调机厂）试制成功的。这就使设计单位在布置空调系统时有可能采用标准设备，降低基建和管理费用，缩短空调机的安装施工期。

但是所生产的设备并不能满足各种建设项目的需要，结果不得不扩大空调装置的品种。这对大规模建设人造纤维企业、各种化工企业、新型行政公共建筑物特别必要。所以在1957—1968年期间卫生工程科研院继续研究新型空调装置，工厂也不断扩大空调装置的生产。

现在苏联建筑筑路市政机械制造部在哈尔科夫和多莫杰多沃市设有两个试验工厂专门生产空调机。

全苏空调通风设备科学研究院（哈尔科夫市）从1968年起对通风空调设备进行了统一。研究院与哈尔科夫空调机厂协作，建立了额定风量为30,000—250,000米³/小时统一空调装置的系列，从1971年起开始成批生产。研究院与多莫杰多沃空调机专用工艺设计局协作，建立了额定风量4000—25,000米³/小时统一的组合式空调机系列。多莫杰多沃空调机制造厂已成批生产KHЭ-V型通用局部诱导式空调器、KHУ型非独立式空调机组及其他设备。增加设备品种能提高空调系统的技术水平，改善运行指标。

空调装置是空调系统最重要的组成部分，是使空气达到给定参数的装置。空调装置可按五个方面进行分类：保证给定参数的可能性，与所服务房间的连接方式，供冷方式，风机产生的压力值和结构型式。

按保证给定参数的可能性，空调装置可分成全年保证空气所需参数的全年性装置和仅在一定季节保证空气所需参数的季节性装置。

按与所服务房间的连接方式，空调装置可分成集中式与局部式。集中式装置远离所服务房间，具有相当长的连接风管。局部性装置布置在所服务的房间内或直接靠近该房间，风管非常短。

按供冷方式，空调装置分成非独立式、独立式和蒸发式。

按风机的压力值,空调装置分成低压(风机全压力小于 100 公斤力/米²)、中压 ($H = 100 - 300$ 公斤力/米²)、高压 (H 在 300 公斤力/米²以上)。

按结构型式,空调装置可分成单元式、组合式和机组式。单元式空调装置在安装现场按空气处理系统图,由制造厂供给的单个单元组装而成。组合式空调装置按空气处理系统及最有利的结构布置(卧式、竖式或混合式)由单个工艺组合件组装成。可在制造厂组装,如果工艺组合件尺寸大,就在安装现场组装。机组式空调装置的特点是制造厂按固定的空气处理工艺系统图供给整体机组。

进行处理空气过程所需的设备是空调装置最重要的部件。设备的计算及设计按气体动力学、流体力学、热工学、热力学及自控原理一般规律进行。所以本书只叙述空调装置设备设计及计算的某些原理,根据空调装置设备的特定用途提出某些建议。

在空调问题上对理论工作贡献最大的是苏联学者 A. A. 果林、П. Н. 加米涅夫、E. E. 卡尔比斯、A. B. 聂斯特连柯、E. B. 斯捷范诺夫、П. B. 乌卡斯特金。在苏联空调机制造部门的建立和设备制造方面贡献最大的是苏联专家 П. М. 枯契诺夫、H. M. 达维多夫、A. И. 达维舍夫、Г. A. 埃兰契克等。

第一章 空调装置中热质交换过程的特点

§ 1.1 湿空气热力学

空调装置的设备中处理大气空气的过程是多种多样的。大气空气为干气体与水蒸汽的单质混合物。空气中的干气体的成分比较固定，含氮 75.55%，氧 23.1%，氩 1%，二氧化碳 0.05% 以及少量其他成分 0.3%（均按重量）。大气空气中经常存在着水蒸汽，空气的干气体与水蒸汽的混合物即称为湿空气。在对空调装置设备计算有实际意义的温度和压力范围内，可以把湿空气看成两种理想气体的混合物，其状态方程式如下：

$$P_c/\rho_c = R_c T, P_u/\rho_u = R_u T \quad (1.1)$$

式中 ρ_c 及 ρ_u ——分别为干空气及水蒸汽的密度（容重），公斤/米³； $R_c = 2.153$ ——干空气气体常数； $R_u = 3.461$ ——水蒸汽气体常数； P_c ——空气中干气体的分压力，毫米水银柱； P_u ——水蒸汽分压力，毫米水银柱； T ——湿空气温度，K。

按道尔顿定律，在稳定状态下几种气体混合物的压力等于该混合物中各气体压力之和。因此，湿空气的总压力等于空气中干气体及水蒸汽压力之和：

$$P_g = P_c + P_u,$$

式中 P_g ——大气空气的总压力或大气压。

在空调计算中大气空气压力和水蒸汽压力一般以公斤力/米²或毫米水银柱为单位。按国际计量单位制（ГОСТ 9867—61），压力以牛顿/米²计算。压力换算按下列关系式进行：

1 牛頓/米² = 0.10972 公斤力/米² = 7.5006 × 10⁻³ 毫米水銀柱。

利用方程式 (1.1) 及氣體常數值可得出密度 (容重) 計算式:
對於干氣體

$$\rho_c = \frac{P_c}{TR_c} = \frac{1}{2.153} \cdot \frac{(P_6 - P_n)}{T} = 0.465 \frac{(P_6 - P_n)}{T} \text{ 公斤/米}^2, \quad (1.2)$$

對於水蒸汽

$$\rho_n = \frac{P_n}{TR_n} = \frac{1}{3.461} \cdot \frac{P_n}{T} = 0.289 \frac{P_n}{T} \text{ 公斤/米}^3.$$

對於濕空氣

$$\begin{aligned} \rho_n &= 0.465 \cdot \frac{(P_6 - P_n)}{T} + 0.289 \frac{P_n}{T} \\ &= \frac{1}{T} (0.465 P_6 - 0.176 P_n) \text{ 公斤/米}^3. \end{aligned}$$

在導出方程式 (1.2) 時, 用了濕空氣總壓力與蒸汽分壓力之差, 代替空氣中干氣體的壓力值, 這是因為濕空氣總壓力及水蒸汽分壓力可以足夠準確而簡單地測定。濕空氣總壓力 P_6 , 根據氣壓計測出的大氣空氣壓力值 $P_{6.3}$ 加以修正後得出:

$$P_6 = P_{6.3} \pm H_{cr} \pm P_1 \pm P_2 \pm P_3 \text{ (毫米水銀柱)}$$

式中 H_{cr} ——測量點與大氣壓力相比的氣流靜壓 (以正號表示) 或負壓 (以負號表示) 的修正值; P_1 ——空氣溫度修正值 (按專門表取用); P_2 ——測量點高度修正值 (按專門表取用); P_3 ——儀表修正值 (按儀表說明書取用)。

在空調裝置設備處理空氣的過程中, 空氣濕度通常是變化的, 所以空氣中水蒸汽的分壓也是變化的。但是, 完全飽和狀態的水蒸汽最大壓力與濕空氣的某一溫度值相對應。完全飽和狀態下的水蒸汽分壓力用 P_n 表示, 稱之為飽和壓力。 P_n 值根據濕飽和空氣溫度從有關的表中查出 (例如參考文獻 [26] 的表格)。

如果濕空氣中的水蒸汽不处在飽和狀態, 那就是過熱水蒸汽,

这种混合物被称为未饱和的湿空气。其中水蒸汽的压力用 P_n 表示。湿空气在一定温度下，其水蒸汽分压力与饱和压力之比称为相对湿度，一般以百分率表示：

$$\varphi = (P_n/P_s)100\%$$

如果将饱和空气冷却，空气就超过饱和极限，空气中将形成由水滴构成的可见雾。饱和湿空气的相对湿度为 100%。如果将这种空气加热，它就变成不饱和状态，其内水蒸汽就处于过热状态。未饱和的湿空气的相对湿度小于 100%。

温度和湿度变化时，湿空气的体积也发生变化。然而单位体积湿空气内的干空气重量保持不变。所以通常以湿空气中干空气的重量为单位来表示湿空气的特性指标。

湿空气中一公斤干空气所含的水蒸汽重量称为含湿量。计算含湿量的公式可以从方程式 (1.1) 中得出：

$$d = \frac{R_c}{R_n} \frac{P_n}{P_c} = \frac{2.153}{3.461} \frac{P_n}{(P_s - P_n)} = 0.622 \frac{P_n}{(P_s - P_n)}$$

$$\text{公斤/公斤干空气。} \quad (1.3)$$

湿空气的焓或含热量 I 可视为空气中 1 公斤干空气及 d 公斤水蒸汽，即 $1+d$ 公斤湿空气所含的热量：

$$I = I_c + I_n \text{ 大卡/公斤干空气。}$$

干空气的焓

$$I_c = c_p t \text{ 大卡/公斤干空气，}$$

式中 t ——空气温度，℃。

在空调设备处理空气过程中，湿空气的总压力变化相当小，所以可以把 c_p 值视为干空气在定压下的比热，在 -50℃ 至 +50℃ 温度范围内，比热采取常数就够精确了，即 0.24 大卡/公斤·度。

d 公斤水蒸汽焓：

$$I_n = (597 + 0.45 t_n) d \text{ 大卡/公斤干空气，}$$

式中 597 大卡/公斤——0℃ 水的汽化热，0.45 大卡/公斤·度——水蒸汽比热， t_n ——水蒸汽温度，℃。

湿空气被视为具有同一温度 t 的单质混合物，于是，湿空气的焓

$$I = 0.24t + (597 + 0.45t)d \text{ 大卡/公斤干空气} \quad (1.4)$$

把公式中与湿空气温度有关的项进行合并得出：

$$I = (0.24 + 0.45d)t + 597d \text{ 大卡/公斤干空气。}$$

$(0.24 + 0.45d)$ 值可理解为 1 公斤湿空气的比热，以 ρ_p 表示。

因此湿空气的焓取决于其温度与湿度。同样的，从公式 (1.3) 中所看到的，在湿空气总压力恒定时，含湿量就由水蒸汽分压值决定。

还需指出在评价湿空气参数时常用的两个指标：露点温度 t_p 及空气湿球温度 t_m 。

如果在含湿量不变情况下湿空气冷却到相对湿度 100%，水蒸汽处在完全饱和状态的温度就是露点温度，因为再降低温度就要使空气中的水蒸汽凝结。因此露点温度代表了在含湿量恒定时湿空气可以冷却的极限。

空气湿球温度用干湿法，即干湿温度计同时测定。测量时可采用实验室用水银式温度计、热电偶、热敏电阻及其他敏感元件作用原理不同的仪表，但需经相应校准和标定。测量干球温度的仪表，其敏感元件应加以保护，不应受热辐射，不应受潮。测量湿球温度的仪表，其敏感元件也应加以保护，不应受辐射，用吸湿材料（一般用细棉布）包起来，用水润湿。

测量未饱和湿空气时，干敏感元件显示出湿空气的温度，水从另一敏感元件湿表面蒸发，水之所以蒸发，是因为未饱和空气中水蒸汽分压力小于测量仪表敏感元件潮湿表面上水蒸汽的分压力。蒸发消耗周围空气及湿棉布上水的热量，水温下降，当蒸发所消耗的热量完全从周围空气中吸取时，水温就下降到极限值。因此空气湿球温度代表了当水蒸发用的热量仅仅从周围空气中吸取时的饱和空气的温度。

空气中水蒸汽分压值一般可根据干湿球温度计读数 t 及 t_m ，

并考虑实际测量条件按下式算出:

$$P_0 = P_{HM} - A_n(t - t_M)P_0 \text{ 毫米水银柱} \quad (1.5)$$

式中 P_{HM} ——所观察的湿球温度下的饱和压力, 毫米水银柱;
 A_n ——干湿系数。

干湿系数数值取决于测量仪表敏感元件潮湿表面附近空气流动速度 v , 按下式计算:

$$A_n = 0.00001 \left(65 + \frac{6.75}{v} \right).$$

湿空气参数之间的关系可用图表明地表示出来, 苏联用得最为广泛的是 Л. К. 拉蒙金教授设计的 $I-d$ 图。绘制热力学图表的原理及其使用方法, 在 П. М. 拉第仁斯基^[26] 和 А. В. 聂斯特连科^[33]

的文献中已作说明。

下面扼要地说一说按 $I-d$ 图查找空气参数的基本特点。图 1 上示出 $I-d$ 图并标出未饱和湿空气的参数符号。如果是饱和空气, 其参数就在等温线 t 与相对湿度 100% 曲线相交处。水的参数与此相类似, 在等温线 t_w 与曲线 $\varphi = 100\%$ 相交处查得。

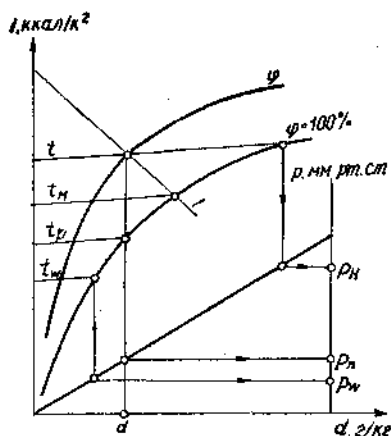


图 1 $I-d$ 图, 供查找湿空气及水的参数用。

$I-d$ 图 为一定的大气压力绘制是 $I-d$ 图的一些缺点, 因为 d 及 I 取决于 P_0 (这点可从公式 (1.3) 和 (1.4) 中看出)。在同一 P_0 及 t 值下, d 和 I 值随大气压力的下降而增大。在空气处理过程中湿空气压力变化大的情况下, 宜根据专门用于压力变化的 $I-d$ 图来绘制处理过程。

§ 1.2 热质交换过程的基本方程式

介质（液体与气体，液体与固体接触等）之间必须存在位势差才能进行传热和传质过程。根据空调装置设备的运转情况来看，用温差作为传热的位势，而传质（水蒸汽）的位势则用水蒸汽的分压差。因此由于介质的各个点之间存在着温差而产生传热，而分压的存在则产生传质。

通常，温度和分压力在空间和时间上的变化是不同的。为了简化起见，我们只探讨一维的位势传递变化的情况。同时假定传递过程是稳定的，即系统各点的温度及分压力不随时间而变化，并且限制在一个坐标方向上。如果将介质中位势相同的各点选出并连接起来，就得出温度相等的等温面，对相等的分压力来说就是等压面。单位长度温度及分压力的最大变化发生在与等温面或等压面成法线的方向上（图2）。

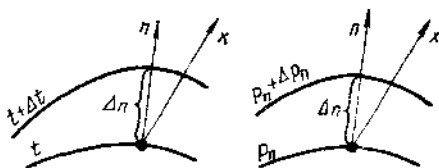


图2 求传递位势梯度值时的恒温及恒压线

相邻两等温线之间温度变化 Δt 与其在法线上的距离 Δn 的比值的极限称为温度梯度，用下列符号中的一种表示：

$$\lim \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t \text{ 度/米。}$$

把位势增大的方向作为位势梯度正方向。热和质都沿位势减小方向传递。

空调装置中的热质交换过程主要取决于热传导、扩散及对流现

象。而辐射热交换份量非常小，可忽略不计。热传导的热传递是在物质直接接触情况下进行的，取决于由温度梯度引起的物质微粒（分子、原子、电子）的热运动。热在固体内的传递过程就是典型的热传导。对于流动着的液体（气体）而言，直接靠近接触面的边界层才属于热传导传热。

法国科学家富里叶提出了表示在单位时间内经过等温面 dF 由热传导所传递的热量的方程式：

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF \text{ 大卡/小时} \quad (1.6)$$

比例系数 λ 是表示物质导热能力的物理特性系数，称为导热系数，其单位是大卡/米·小时·度。系数 λ 的数值由各种物质的试验结果来确定。

单位时间内经表面 dF 由分子扩散所传递的物质质量 dG_m 按斐克方程式计算：

$$dG_m = -D_p \frac{\partial P_n}{\partial n} dF \text{ 公斤/小时} \quad (1.7)$$

比例系数 D_p 称为一成分向另一成分扩散的分子扩散系数或简称为扩散系数。对于水蒸汽和空气的混合物内的扩散过程来说，系数 D_p 可按下式计算：

$$D_p = \frac{0.0627}{P_6} \left(\frac{T}{273} \right)^{0.6} \text{ 米/小时}$$

把公式 (1.6) 和 (1.7) 改写成

$$q = \frac{dQ}{dF} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{小时} \quad (1.8)$$

$$g_m = \frac{dG_m}{dF} = -D_p \frac{\partial P_n}{\partial n} \text{ 公斤/米}^2 \cdot \text{小时} \quad (1.9)$$

热流密度 q 和质流密度 g_m 分别与温度梯度和分压力梯度成比例，其方向指向位势梯度减小的方向。分子传递热流及质流的微分方程的结构是相似的，这说明热传导与扩散现象之间有相似之处。