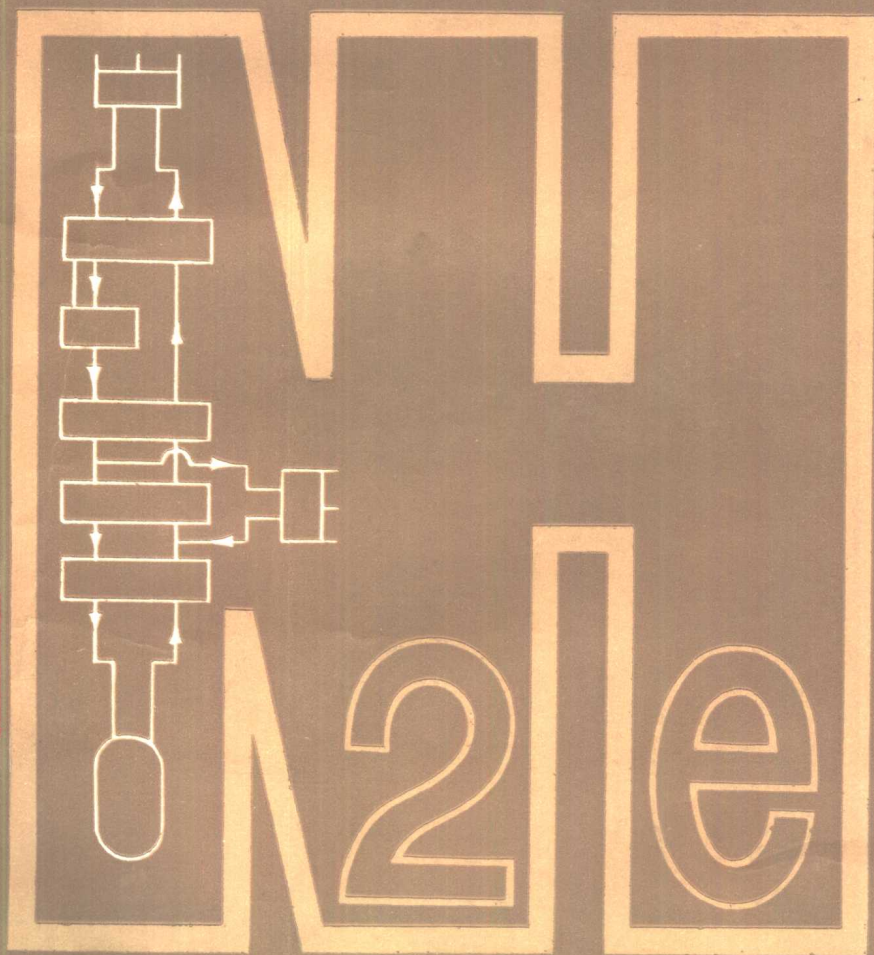


低温装置计算

第 二 版

〔苏联〕С.С.布德涅维奇 主编

化学工业出版社



低温装置计算

第二版

〔苏联〕 C. C. 布德涅维奇 主编

林 应 国 译
张 均 生 校

化学工业出版社

内 容 简 介

这是一本苏联高等学校《制冷机与压缩机》和《低温技术》两个专业学生的学习参考书，也是苏联低温科技界颇为流行的参考资料。

本书论述了低温装置计算的原理与方法，对气体分离装置、液化装置和低温制冷机的计算，以及设备的结构设计作了详细介绍。全书共六章，无论在计算方法，或是在流程确定、设备选型和结构形成的论述中，作者都力求反映出低温科学技术的最新成就。书中列举了大量的计算例题，其计算严密，层次分明，便于仿效；所推荐的计算程序和经验公式与数据，可供设计人员参考。

本书可作为高等学校低温物理、制冷与低温技术、化工机械等专业的教学参考书，也可供从事低温科学技术工作的科研人员和工程设计人员参考。

С. С. Будневич

РАСЧЕТ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

Второе издание

Ленинград Издательство «Машиностроение», 1979

低 温 装 置 计 算

第二版

林 应 国 译

张 均 生 校

责任编辑：任文斗

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $12^{1/2}$ 字数328千字印数1—2,060

1986年12月北京第1版1986年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3828定价3.10元

译者序

低温技术通常是指获得 $120\text{K}\sim 0.3\text{K}$ 范围的科技领域。它从十九世纪中叶开始发展，至今已有一百年的历史。其间，本世纪三十年代到五十年代，为了满足化工、钢铁等基础工业的发展，低温技术以发展空分装置为主；而五十年代到六十年代，为了适应火箭和超导技术的发展，则以发展液化装置（液氢、液氮）为主；最近十多年来，为了满足红外技术、电子计算机、宇宙航行等的需要，低温微型制冷机如雨后春笋，迅速发展。因而，气体分离装置、液化装置和低温制冷机成为低温技术的三个方面。现在，低温技术已经广泛地应用于工农业生产的各个部门，许多尖端科学的发展也与其密切相关，特别是宇宙空间技术、原子能工程、红外探测技术和超导技术等。低温技术与相关学科之间的互相渗透，互相促进，形成了一些新的边缘学科，例如，低温电子学、低温物理、低温化学、低温医学和低温生物学等，从而大大地促进了现代科学技术的发展。

近年来，我国许多部门和单位开始从事低温技术的试验研究工作，其深度与广度不断扩展，目前正处在迅速发展的阶段。但是，由于低温技术在我国毕竟是一门新兴的学科，设计研究的参考资料不多，更缺乏系统介绍本专业设计计算的书籍。在这一方面，苏联科学技术博士、教授 C. C. 布德涅维奇主编的这本书，为我国有关专业的师生和从事低温工作的技术人员，提供了一本有价值的参考资料。

本书初版问世于1972年，当时的书名为《深冷装置计算实例》，本译文是第二版，改名为《低温装置计算》。全书共六章，书中详细介绍了各种类型的气体分离装置、液化装置、低温制冷机以及低温装置中常见设备（换热器、精馏塔和吸附器）的计算

方法、参数选择、设备结构等。各部分均有相应的计算例题，其计算程序和推荐的经验公式与数据有一定的参考价值。书中内容新颖，基本上概括了低温技术的各个方面，作者力求说理简明，深入浅出，并注意反映低温技术的近代发展情况。

译者在翻译过程中，更改了原书的符号，对书中个别不妥之处作了译注，错误的数据加以修正。限于译者的水平，译文中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

译者 1983年10月

原 序

这是一本教学参考书，初版问世于1972年，当时的书名是《深冷装置计算实例》。从那时到现在，已经过了六年。在低温技术飞速发展的现代，这六年的时间是不算短的。在这段时间内，低温技术领域的一些专业术语发生了变化。这是本书改变书名的主要原因。

本版与第一版比较，在内容上有重大的变更：增添了低温制冷机的计算，多组分气体混合物分离装置的计算，工业氮纯化器的计算等新章节；删去了空气液化装置的计算，制取工业气态氧装置的计算等章节。

本书的结构也作了重大修订。无论在计算方法的叙述中，或者在流程决定、设备选型和设备结构形式的论述中，作者都力求反映出低温科学技术的最新成就。因此，书中的全部计算实例，或者是新添的，或者是以新的数据为依据的。

书中对制冷循环、液化循环和分离过程的最优化问题十分重视。

参加本书编写工作的人员及其分工如下：С. С. 布德涅维奇编写第一、五、七、九、十二、十四、十五、十八、二十一、二十二节；Л. А. 阿库洛夫编写第二、四、八、十一、十七、十九节；Е. И. 保尔津科编写第六、十三、二十节；Г. А. 戈洛费科编写第三、十、十六、二十三至二十五节。

作者恳切希望读者对本书内容给以批评指正。

主要符号表

符号	意 义	单 位
A	1. 吸收因素 2. 传热面积	m^2
α	1. 导温系数 2. 回热器填料的比表面积	m^2/s m^2/m^3
α_d	吸附剂的动吸附容量	$cm^3/g, kg/m^3$
c	1. 浓度 2. 比热容	$kJ/kg \cdot K$
c_p	1. 定压比热容 2. 平衡浓度	$kJ/kg \cdot K$
D	1. 扩散系数 2. 直径	$cm^2/s, m^2/min$ m
d_o	外径	m
d_i	内径	m
d_e	当量直径	m
G	流体量	kg
g	1. 流体单位量 2. 重力加速度	按书中标注的单位 m/s^2
H	高度	m
h	比焓	kJ/kg
K	相平衡常数	
h	1. 传热系数 2. 绝热指数	$W/m^2 \cdot K$
L	1. 液体流量 2. 管子长度	按书中标注的单位 m
M	分子量	
m	1. 质量 2. 翅片参数	kg $1/m$
N	功率	kW
n	1. 塔板数 2. 换热器的传热管子数 3. 转速	r/min
p	压力	kPa, MPa
Q	热负荷	W, kW
Q_s	跑冷损失	按书中标注的单位
q	单位热负荷	按书中标注的单位

续表

符号	意 义	单 位
R	气体常数	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
r	汽化潜热	kJ/kg
S	1. 活塞行程 2. 横截面积	m m^2
s	比焓	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
T	热力学温度	K
T_a	周围介质温度	K
T_d	露点	K
t	1. 摄氏温度 2. 间距	$^{\circ}\text{C}$ m
V	气体流量	按书中标注的单位
v	比容	m^3/kg
W	功	kJ
w	1. 单位功 2. 流速	按书中标注的单位 m/s
w_v	空筒(塔)速度	m/s
x	液相中某组分的摩尔浓度	
y	汽相中某组分的摩尔浓度	
z	1. 液化率 2. 压缩性系数	
α	放热系数	$\text{kW/m}^2\cdot\text{K}$
β	1. 液化循环的效率(热行完善度) 2. 提取率 3. 吸附动力学传质系数	
δ	厚度	l/min m
ε	1. 回热器填料的空隙率 2. 正仲氢转化时的转化率	
η	效率	
η_m	机械效率	
η_p	膨胀机的绝热效率	
η_T	压缩机的等温效率	
λ	导热系数	$\text{kW/m}\cdot\text{K}$
μ	动力粘度	$\text{N}\cdot\text{s/m}^2$
ν	运动粘度	m^2/s
ξ	摩擦阻力系数	

续表

符号	意 义	单 位
π	对比压力	
ρ	密度	kg/m ³
σ	1. 压缩比 2. 表面张力	N/m
τ	1. 对比温度 2. 时间	s, h
φ	翘化系数	
ω	偏心因子	

相似准则

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} \text{——雷诺准数}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \text{——普兰德准数}$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \text{——努塞尔特准数}$$

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^3} \beta \Delta t \text{——格拉斯霍夫准数}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \text{——欧拉准数}$$

$$St = \frac{\alpha}{c_p \rho w} \text{——斯坦顿准数}$$

下角标

符号	意 义	符号	意 义
a	周围介质的	con	冷凝的
ad	吸附器, 吸附剂	cr	临界的
adi	绝热的	E	膨胀腔的
aux	辅助的	e	膨胀机的
b	平衡的	ev	蒸发器的, 蒸发的
C	压缩腔的	ex	排出的, 出口的
c	转化的, 压缩机的, 循环的, 冷的	g	气体的

续表

符号	意 义	符号	意 义
HP	高压的	o	外面的
h	热的	out	外冷源的
i	内部的	opt	最佳的
id	理想的	p	假定的
in	进口的	pr	实际的
ini	初始的	re	返流的
L	液体的	reg	再生的
LP	低压的	s	饱和的
l	下部的, 损失的	t	节流的, 总的
lf	环流的	th	理论的
lim	极限的	u	上部的
m	混合物的, 平均的	V	蒸气的, 真空的
max	最大的	w	壁面的
min	最小的	0	标准状态的

注：本表中符号的其它物理意义和单位，以及书中个别章节所用符号的物理意义和单位，均在本书有关章节说明。

目 录

译者序

原序

主要符号表

第一章 低温装置计算的一般问题	1
第一节 低温液化装置和低温制冷装置的计算特点	1
第二节 低温液化装置计算时主要参数的选择	12
第三节 制取液态产品的气体分离装置计算特点	18
第四节 多组分混合物分离过程计算的一些特点	22
第二章 低温制冷机的计算实例	31
第五节 氮低温制冷机的计算	31
第六节 逆向斯特林循环气体制冷机的计算	62
第三章 液化装置的计算实例	92
第七节 氢液化装置的计算	92
第八节 氮液化器的计算	131
第四章 气体分离装置的计算实例	148
第九节 同时制取工艺氧和工业氧的空分装置计算	148
第十节 同时制取液氧和提氩的空分装置计算	182
第十一节 变换气分离装置的计算	218
第五章 低温装置设备的计算方法	240
第十二节 低温换热器的传热计算与结构计算特点	240
第十三节 冷凝蒸发器主要结构尺寸的确定	258
第十四节 精馏塔主要结构尺寸的确定	270
第十五节 空分装置蓄冷器内二氧化碳析出过程和 升华过程的计算	279
第十六节 低温气体中杂质清除过程的计算特点	286
第六章 低温装置设备的计算实例	297
第十七节 盘管换热器的计算	297
第十八节 三股流换热器的计算	306

第十九节 板翅式换热器的计算	314
第二十节 冷凝蒸发器的计算	330
第二十一节 空分装置精馏塔的计算	338
第二十二节 空分装置蓄冷器的二氧化碳不冻结性计算	354
第二十三节 空气中水分和其它杂质共吸附的吸附器计算	363
第二十四节 分子筛吸附器的结构与计算	370
第二十五节 工业氮纯化器的计算	378
参考文献	386

第一章 低温装置计算的一般问题

第一节 低温液化装置和低温制冷装置的计算特点

一、低温液化循环的计算特点

图 1-1 示出压力为 p_0 的低压气体液化过程 (1—2—0) 和压力为 p 的气体液化过程 (a—b—0)。在前一种情况下, 气体是在变温下冷却 (即 1—2 过程), 并在恒温 T_0 下冷凝 (即 2—0 过程); 在后一种情况下, 气体先在变温下冷却 (即 a—b 过程), 而后进行膨胀 (即 b—0 过程)。实际上, 常用节流过程 $b'—0$ 代替绝热膨胀过程。由此可见, 高于临界压力的压缩气体, 其热量的排除是在变温下进行的, 这样, 如果借助膨胀机循环液化气体, 就可以减少不可逆损失。下面讨论压力为 p 的压缩气体的液化过程。

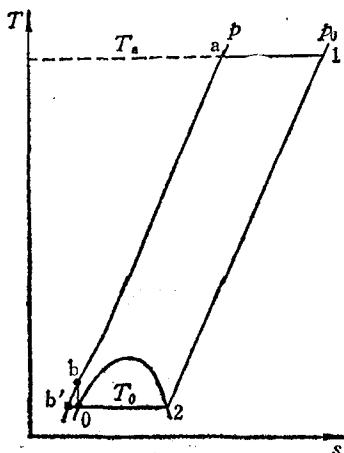


图 1-1 低压与高压气体的液化

待液化气体的热量, 用多级冷却的方法排除。当选择冷却级数时 (见下面), 其温度应实现最佳化。用以使液化气体多级冷却排除热量的制冷循环也必须最佳化。

带膨胀机和节流阀的气体制冷循环, 在低压下沸腾的低温液体以及气体制冷机, 都可以作为冷却级的冷源。对于小型低温液化装置, 液化过程的成本主要取决于管理装置的劳动力的成本, 生产

液化气体的能耗成本，它们占整个成本的20~30%。对于这种装置，必须简化液化过程，以便不要高度熟练的工人就能操作。在这种情况下，采用最少的冷却级数，以便最大限度地简化流程。对于大型液化装置，能耗是液化过程成本的主要部分，因此应增加冷却级数，并根据能耗最小的原则，确定冷却级数。下面我们以两级和三级液化循环为例，讨论液化装置的计算特点。

带膨胀机冷却级和节流阀冷却级的两级液化循环 图1-2示出两级装置的原理流程图和气体液化过程的 $T-s$ 图。第一级冷却是利用膨胀机的气体循环1—2—3—4—9—1实现的，它使压缩到压力为 p 的气体冷却，其过程为2—5。然后气体在节流级冷却，其过程为5—0。在这个过程中，由于节流循环1—2—5—6—7—8

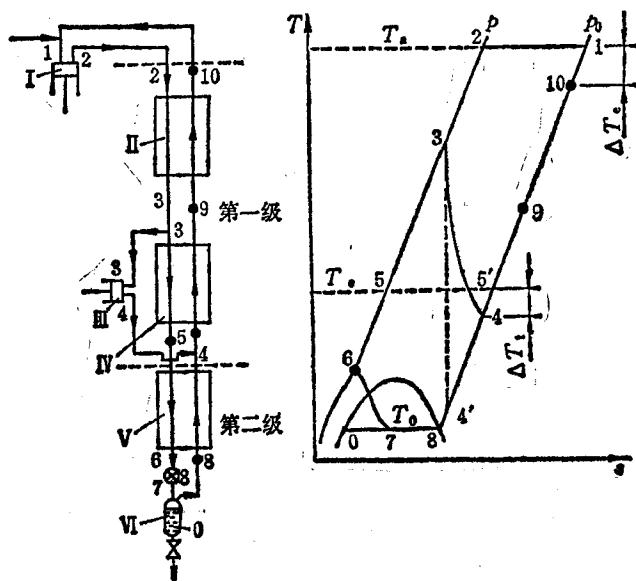


图 1-2 两级冷却的液化循环

I—压缩机；II—膨胀机冷却级的第一换热器；III—膨胀机；IV—膨胀机冷却级的第二换热器；V—节流换热器；VI—液化容器

—5'—1的作用产生冷量。文献[8]指出,待液化气体在6—0过程的冷却,实际上就是节流循环气体与待液化气体混合物的节流过程6—7,而节流后湿蒸气状态7分离为液体状态0和干饱和蒸气状态8。

液化过程的计算,以生产1 kg液化气体为基准。计算时必须选取膨胀机级热端温差 $\Delta T_e = T_1 - T_{10}$ 和节流级热端温差 $\Delta T_t = T_5 - T_4$ 。根据经验数据,膨胀机级的跑冷损失取为 $q_3^{T_e \sim T_5}$,节流级的跑冷损失取为 $q_3^{T < T_5}$ 。跑冷损失以该冷却级内1 kg循环气体为基准。设计低温气体冷却装置时,选取温差和确定跑冷损失的原则见第二节。在下面的叙述中,假定上述数值以及压缩气体的最终压力 p 和温度 T_5 均为已知。低压气体压力 p_0 通常取为大气压 (0.1 MPa)。下面讨论这些参数的最佳化。

制冷循环用以冷却待液化气体,其循环气体单位流量可用热量平衡方法求得^[43, 8]。我们利用这种方法计算两级冷却液化循环。

液化循环计算从低温节流级开始 (如图1-2所示)。

1. 节流冷却级热量平衡,若以生产1 kg液化气体为基准,可写成下式:

$$(1 + g_t)h_5 + g_t q_3^{T < T_5} = h_0 + g_t h_4 \quad (1-1)$$

式中 g_t ——节流循环中循环气体的单位流量 (以1 kg液化气体为基准), kg。

从式 (1-1) 可得:

$$g_t = \frac{h_5 - h_0}{(h_4 - h_5) - q_3^{T < T_5}} \quad (1-2)$$

令

$$\left. \begin{aligned} Q_{0,t} &= h_5 - h_0 \\ q_{0,t} &= (h_4 - h_5) - q_3^{T < T_5} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

这里, $Q_{0,t}$ 为节流冷却级单位冷却负荷 (以1 kg液化气体为基准), kJ; $q_{0,t}$ 为节流循环单位有效制冷量 (以节流循环内1 kg循环气体为基准), kJ。

2. 膨胀机冷却级的热量平衡方程式为:

$$\begin{aligned} (1 + g_t + g_c)h_2 + g_t h_4 + (g_t + g_c)q_3^{T_a \sim T_5} \\ = g_t h_5 + (g_t + g_c)h_{10} + g_c \eta_s \Delta h_0 \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 g_c ——膨胀机循环中循环气体的单位流量 (以 1 kg 液化气体为基准), kg;

η_s ——膨胀机绝热效率;

Δh_0 ——膨胀机绝热焓降, kJ/kg。

解方程式 (1-4) 可得未知数 g_c :

$$g_c = \frac{(h_2 - h_5) + g_t [(h_2 - h_5) - (h_{10} - h_4) + q_3^{T_a \sim T_5}]}{(h_{10} - h_2) + \eta_s \Delta h_0 - q_3^{T_a \sim T_5}} \quad (1-5)$$

令

$$\left. \begin{aligned} Q_{0,e} &= (h_2 - h_5) + g_t [(h_2 - h_5) - (h_{10} - h_4) + q_3^{T_a \sim T_5}] \\ q_{0,e} &= (h_{10} - h_2) + \eta_s \Delta h_0 - q_3^{T_a \sim T_5} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

这里, $Q_{0,e}$ 为膨胀机冷却级单位冷却负荷, kJ/kg_{液化气体}。由式 (1-6) 可以看出, 它是膨胀机冷却级待液化气体所放出热量 $h_2 - h_5$ 和这一级带入节流级的制冷量 $g_t [(h_2 - h_5) - (h_{10} - h_4) + q_3^{T_a \sim T_5}]$ 之和。这个制冷量一部分用于增加节流循环制冷量, 另一部分用于补偿液化循环气体温度在 $T_a \sim T_5$ 区段内的跑冷损失; $q_{0,e}$ 为膨胀机循环单位有效制冷量 (以这种循环内 1 kg 循环气体为基准), kJ。

液化循环特性参数通常用液化率 Z 表示, 它以压缩机内压缩 1 kg 气体为基准。

$$Z = \frac{1}{1 + g_t + g_c} \quad (1-7)$$

3. 不计膨胀机回收功的单位能耗 (kJ)

$$W = \frac{(1 + g_t + g_c)RT_a \ln(p/p_0)}{\eta_r} \quad (1-8)$$

式中 η_r ——压缩机等温效率, 通常取为 0.6。活塞式膨胀机的绝热效率取为 0.75~0.8。

循环计算后要作出换热器的温度曲线图, 并说明所设计的热

交换过程是否能够实现。这是因为，在一定压力下，流体的比热是变化的，在我们感兴趣的状态范围内，气体的比热是温度的函数。

三级冷却（外冷源，膨胀机和节流）的液化循环 我们以图 1-3 所示的三级冷却循环过程，作为第二种液化循环计算方法的例子。待液化气体在过程 2—3 的冷却，是靠外制冷循环进行的；在过程 3—6 的冷却，是通过膨胀机循环 1—2—3—4—5—10—3'—1 的冷量实现的；在过程 6—0 的冷却，则是通过节流循环

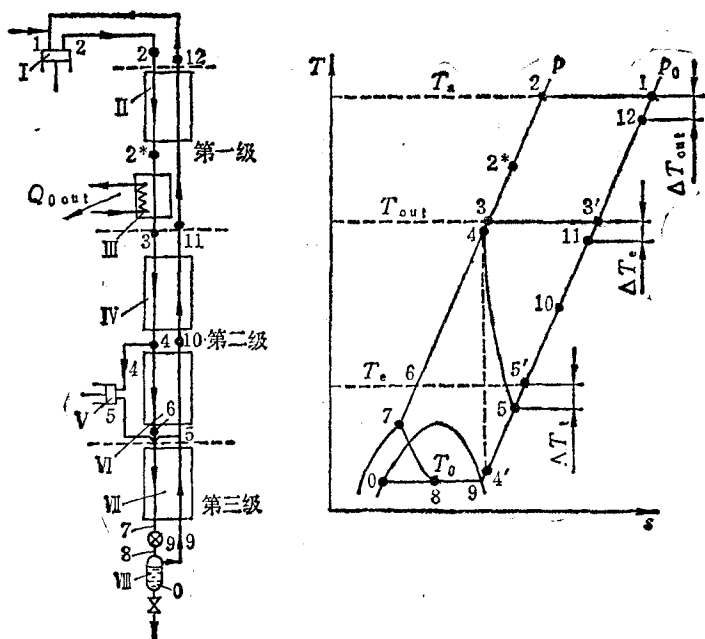


图 1-3 三级冷却的液化循环

I—压缩机；II—外冷源级的换热器；III—利用外冷源冷却压缩气体的换热器；IV—膨胀机冷却级的第一换热器；V—膨胀机；VI—膨胀机冷却级的第二换热器；VII—节流换热器；VIII—液化容器