

透平膨胀机中的三元流动 与两相流动

计光华 编著



西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书重点分析了透平膨胀机通流部分中的三元流动、损失计算、叶型设计及两相流动。从理论高度上提出提高透平膨胀机效率和延长透平膨胀机使用寿命的办法。本书除基本理论外,还包含了作者近几年来科研工作的成果,提供了有关部分的计算机计算程序框图,以及计算和实验的结果。

本书可作为低温工程专业硕士研究生和高年级本科生的选修课的主要参考书。对从事制冷与低温技术以及能量回收方面的科技人员,也是一本有益的参考书。

透平膨胀机中的三元流动与两相流动



陕西省建筑总公司印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 7.625 插页 1 字数: 161 千字

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数: 1—1000

ISBN7-5605-0203-2/TK·24 定价: 1.60 元

前 言

本书重点分析了透平膨胀机通流部分的三元流动、损失计算、叶型变换及两相流动。供低温工程专业透平膨胀机方向的两年制硕士研究生学习专业课使用，也是高年级本科生《透平膨胀机通流部分中的三元流动与两相流动》选修课的主要参考书。

透平膨胀机的效率和寿命是影响低温装置和能量回收装置能否充分发挥经济效益的关键因素，本书的最终目的就在于提高透平膨胀机的效率和延长其寿命，因此本书是从事制冷与低温技术以及能量回收方面科技人员的有益参考书。本书还对于从事径向透平方面工作的科技人员提供了有益的借鉴。

本书的主要内容自1981年以来为《制冷与低温技术》专业本科生及《低温工程》专业硕士生讲授和使用，除了基本内容外，还包含了近几年来我们科研小组和研究生的部分科研成果，这些科研成果包括计算机计算程序框图，以及计算结果和部分实验结果。

由于针对透平膨胀机所做的这方面研究的参考文献不多，书中观点和分析会存在错误和缺点，欢迎大家指正。

本书由清华大学工程力学系张兆顺教授审阅，西安交通大学司国安同志责任编辑。利用这个机会，特向他们及支持本书编写工作和提供资料的同志们致以谢意。

注：本书中重要的结论性的公式标有黑框。

计光华

1987年于西安交通大学

目 录

1. 绪论	(1)
2. 三元流动的基本原理及计算方法	(10)
2.1 复习一些数学知识	(10)
2.2 控制容积与随体微商	(16)
2.3 流量连续方程	(19)
2.4 动量方程	(20)
2.5 能量方程	(21)
2.6 三元流动的基本方程	(23)
2.7 正命题求解三元流动 (Katsanis 方法) ^[13]	(28)
2.8 用分析法求解简化叶轮的子午面	(33)
2.9 正命题求解法的具体应用 ^[6]	(35)
2.10 正命题求解典型透平膨胀机工作轮 三元流动的示例	(42)
2.11 逆命题求解三元流动	(46)
3. 损失的分析及其计算	(51)
3.1 概述	(51)
3.2 边界层的基本方程	(52)
3.3 洛强斯基方法求层流边界层中的流动 ^[8]	(56)
3.4 洛强斯基方法在紊流边界层中的推广	(67)
3.5 边界层的过渡与脱离	(75)
3.6 能量损失系数	(79)
3.7 透平膨胀机工作轮轮盘摩擦损失的 计算示例	(81)

3.8	端面损失与流出边损失	(87)
3.9	工作轮中损失计算的源程序	(95)
4.	叶型变换的基本原理及其方法	(97)
4.1	概述	(97)
4.2	保角变换的基本概念	(99)
4.3	直列叶栅与径向叶栅之间的变换	(105)
4.4	叶型变换示例	(108)
4.5	大叶片喷嘴径向叶栅的分析	(110)
4.6	径向叶栅斜切口段型线的设计	(112)
5.	气液两相流动的基本原理及其应用	(116)
5.1	概述	(116)
5.2	两相流动的模型	(120)
5.3	无自发冷凝时的一元流动	(122)
5.4	有自发冷凝时的一元流动	(133)
5.5	液滴数目和尺寸不变的两相三元流动	(147)
5.6	表面张力	(155)
5.7	过冷度与液滴临界半径	(166)
5.8	Wilson 点	(170)
5.9	膨胀过程中临界核心数及成核率	(172)
5.10	双组分工质自发冷凝时的成核率	(182)
5.11	液滴的增长	(194)
5.12	二次液滴的形成及 Weber 数	(198)
5.13	氮和氧氮混合工质 Wilson 点的试验研究	(204)
5.14	其他工质 Wilson 点的试验结果	(222)
附录 1	常用符号对照表	(229)
附录 2	标记符号意义	(232)
参考文献		(233)

1. 绪 论

透平膨胀机是透平机械中一个比较年轻的分支。从原理上讲，它和蒸汽透平、燃气透平、废气透平一样，都属于一种利用工质的气体动力过程进行能量转换的原动机。由于用途及工质的不同，使透平膨胀机带有一些新的特点，从而逐步形成了一个新的、独立的分支。按用途区分，透平膨胀机有制冷用和能量回收用两大类。制冷用透平膨胀机的主要作用是获得比周围环境温度低的工作条件。例如，在空气调节，低温及高空环境模拟，宇宙环境模拟以及诸如空气、天然气、油田伴生气、焦炉煤气等的液化与分离，氢、氨的制冷与液化等装置中，都可以见到这类透平膨胀机的实际应用。能量回收用透平膨胀机是近十几年才迅速发展起来的，由于能源的消耗日益增多，使以往人们不屑一顾的低品位能源及二次能源日益受到重视。其中除部分具有一定位能的工质可以直接进入膨胀机进行膨胀之外，大部分需要借助中介介质以提高位能。前者如高炉气透平膨胀机、烟气透平膨胀机、化工尾气透平膨胀机、气井和油井的天然气、油田气透平膨胀机等。后者有各种氟里昂透平膨胀机、丙烷透平膨胀机、异丁烷透平膨胀机等。由于这些都是低沸点的有机介质，而且都用于朗肯循环中，因此通常都统称为有机介质朗肯循环透平膨胀机，简称 ORC 透平膨胀机。

透平膨胀机虽然也有轴流式和径流式之分，但是根据它

们的工作特点,为了使装置更加紧凑、节省投资,在通常的工作参数范围内绝大多数透平膨胀机都采用径流式,而且是向心流动的径流式或径-轴流式。只有在很大功率的情况下才考虑采用轴流式。

在透平膨胀机中膨胀的工质通常都是在气相区内工作,这类单相透平膨胀机已经有比较成熟的理论和实践经验^[1]。随着透平膨胀机应用领域的扩大,循环效率的进一步提高,已经对工作在两相区的透平膨胀提出了要求,并在实践中积累了一些经验,在实践中发现的问题要求从理论上对它们进行系统的研究和总结。在透平膨胀机中的两相流动主要是指气-液两相流动或气-固两相流动,其中气相是连续的,液相或固相是离散的,它们的比重都要比气体大,因此受到比较

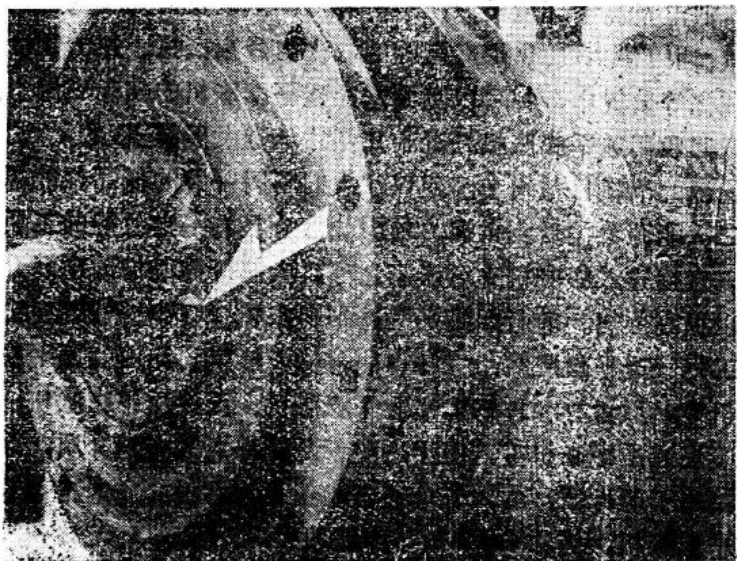
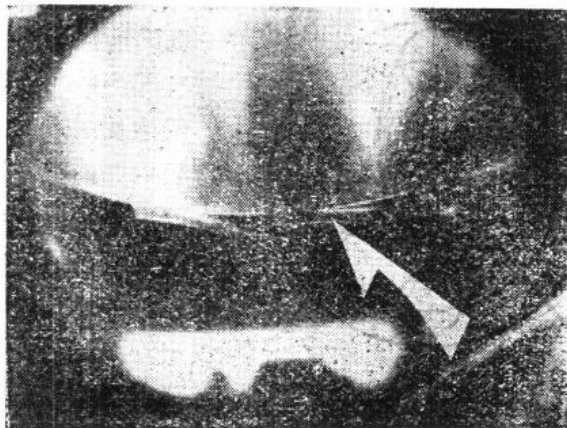


图 1.1 叶片的损坏

大的离心力，促使它们有从叶轮中心指向外周方向流动的趋势。这一趋势是与工质的主流方向相反的，从而造成液滴或固体微粒对通道表面的冲蚀和磨损，使寿命降低，甚至酿成事故。图 1.1 就是这种向心径-轴流式空气透平膨胀机在运转中出现固体微粒后所造成的喷嘴叶片出口端严重磨损及工作轮叶片进口部分断裂的损坏情况(如图中箭头所指)这种损坏轻则使等熵效率下降，膨胀后工质温度达不到设计要求，重则破坏动平衡，产生严重振动，造成轴承及轴封损坏，被迫停机。在出现液滴的情况下也会产生上述磨损现象，虽然不及上述严重，但是长期运转后也会使叶片出现麻点、凹坑以及断裂。图 1.2 所提供的是常规带液小于 10% 重量百分比的天然气透平膨胀机喷嘴和工作轮的照片。可以看出，喷嘴叶片出口端面 and 背面已经出现了密布的麻点，工作轮叶片的进口端部也有磨损现象。在向心径流式工作轮中实际上磨损最频繁的还是叶片进口段的背面(吸力面)，在这两台膨



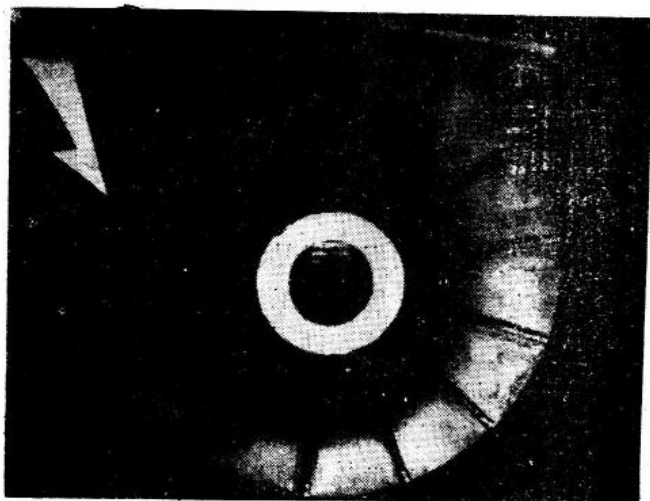


图 1.2 叶片的磨损

胀机中没有提供叶片侧面磨损情况的照片。

在低温氦透平膨胀机中，由于杂质气体在低温下凝固成

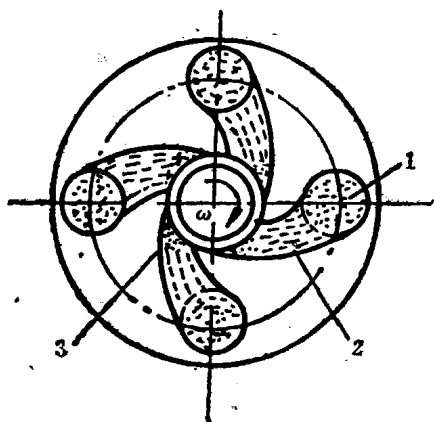


图 1.3 氦透平膨胀机蜗壳的磨损

微粒，也产生对流道壁面的磨损。图 1.3 是在我国生产的大型氦液化器中使用过的透平膨胀机内四蜗室及无叶喷嘴的磨损情况。由于进口时氦气已经带有固体微粒，使蜗室进口处 1 打出许多麻点；进入蜗室喷嘴后较大的微粒又把通道表面 2 拉出痕迹，

在蜗室端部——无叶喷嘴部位 3 出现了大量麻点，不仅在正视图上有，而且在侧表面更加集中。上述三种情况都反映了由于微粒或液滴在运动中有一部分被工作轮抛向喷嘴，使喷嘴出口段的叶背部位受到冲刷。

磨损不仅出现在向心径流式透平膨胀机中，在轴流式透平膨胀机中同样也有这种现象。图 1.4 提供的就是我国制造的一台轴流式石油裂解气透平膨胀机动叶片的磨损情况。由于裂解气含有大量催化剂固体微粒，使通流部分各个部件

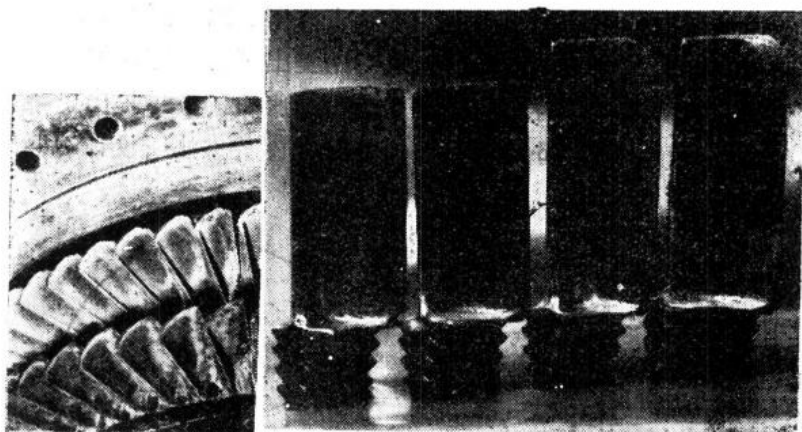


图 1.4 轴流式裂解气透平膨胀机动叶的磨损

（包括动叶、静叶、导向叶及其环体等）都出现严重磨损。动叶内弧根部磨出光亮层，中部喷涂层大片剥落，出口边明显削薄。

此外，还有一类两相透平膨胀机的工质中的液相是连续的，气相则是离散的，成气泡状存在。这类两相膨胀机有闪蒸液体膨胀机、液力膨胀机、超临界流体膨胀机等。它们用

于地热水的膨胀回收能量、超临界氨的膨胀制冷等领域。这种膨胀机的工质在进口时几乎是全液的或超临界的，膨胀后出现气-液两相。由于气泡的出现形成气穴现象，造成气蚀，严重损坏通道表面。

除去上述机械上的磨损外，由于膨胀机的工质中各相之间的相互影响，以及相变过程中存在的各种损失，也引起了附加的流动损失，使透平膨胀机的等熵效率下降。

为了减少磨损、提高寿命以及减少附加损失、提高等熵效率，我们对两相透平膨胀机中的三元流动、损失组成、叶型选择以及液滴的形成及其运动规律等方面作了比较深入的理论分析和部分试验研究，根据分析结果提出了计算方法编制了计算机计算程序，并对今后两相透平膨胀机的设计提出了某些改进意见。图 1.5 给出了按改进后的设计方法所设计的两

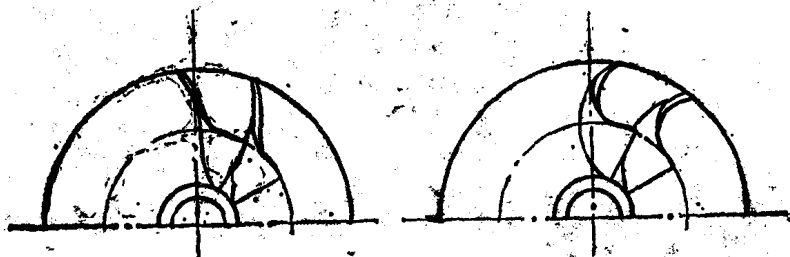


图 1.5 两相透平膨胀机工作轮的设计方案

种不同进口状态的两相带液透平膨胀机的工作轮。在这里，工作轮叶片的型线是按照带液流动的要求，经过计算机计算液滴的运动轨迹而设计的。其中第一台工作轮是 90° 进气，根据液滴流动的要求，叶片进口安装角是前弯的。第二台工作轮的设计进气角是小于 90° 的，考虑液滴流动的要求后，

采用后弯叶片。为了减少流动损失，按照三元流动计算后的流场分析，对叶片间的流通作了变宽度的处理，即叶片在轴线方向的厚度从根部到顶部逐渐削薄。

图 1.6 提供了美国 Airco 公司生产的两相带液透平膨胀机的中心体外形；左图的右端是膨胀机的工作轮，下图的左

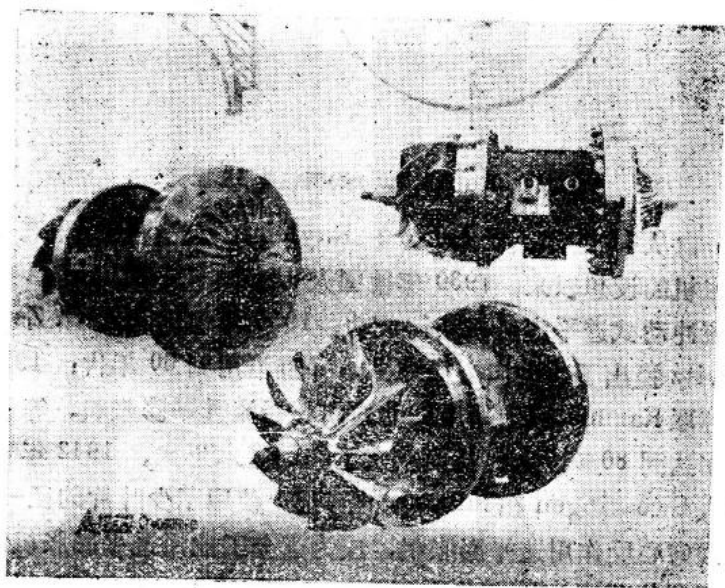


图 1.6 Airco 公司的两相透平膨胀机

端是制动压缩机的工作轮。从膨胀机工作轮的外形可以看出，图 1.5 中第一台的设计方案是和它一致的，采用前弯的叶片进口安装角。

图 1.7 则是最早生产带液透平膨胀机的美国 Rotoflow 公司的天然气分离制取乙烯装置中使用的两相透平膨胀机工作轮，它具有三元流动和带液流动的设计。

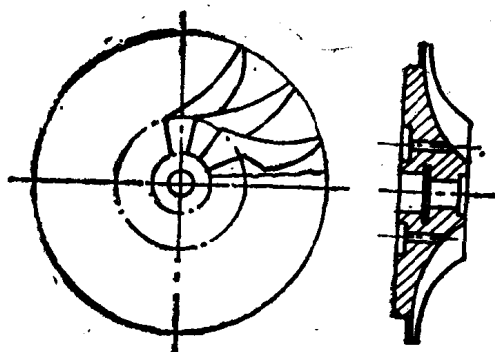


图 1.7 Rotoflow 公司两相透平膨胀机

自从 1898 年英国人 Lord Rayleigh 首先提出应用透平膨胀机的设想以来, 1930 年德国人 Linde 第一次应用单级轴流冲动式透平膨胀机获得成功; 1936 年意大利人 G. Zerkowicz 提出了冲动向心径流式, 一直沿用到 60 年代; 1939 年苏联 Калица 院士采用反动式向心径流透平膨胀机, 等熵效率达到 80% 以上, 从而奠定了它的基本形式。1942 年美国人 Swearingen 在 Калица 的基础上使用了少叶片的径-轴流式向心反作用透平膨胀机, 成为当今工业用透平膨胀机的主要结构型式。60 年代美、德、苏等国又相应发展了小型高速、大膨胀比、高压大功率等多种用途的透平膨胀机, 但其基本型式大致相似。70 年代能源危机促进了透平膨胀机在能量回收方面的应用, 除了大气量、大功率的膨胀机采用轴流式之外, 绝大多数透平膨胀机仍然沿用了向心径-轴流式。

但是上述这些透平膨胀机, 尽管用处不同, 其工质仍然是处于单相区内工作的。

1970 年 Swearingen 成功地实现了带液的两相透平膨胀机,以后又实现了全液膨胀。此外,也出现了喷嘴出口气流马赫数达 $1.5\sim 2$ 的超音速透平膨胀机,以及按三元流动设计的透平膨胀机。这些都是当前国际上在透平膨胀机技术方面的新发展。

2. 三元流动的基本原理及计算方法

以往人们在设计透平膨胀机通流部分的型线时，都是按一元流动的方法来处理，对于由此而产生的问题经常采用经验系数及推荐值来满足实际的需要，这就给改进设计和提高性能带来了一定的盲目性。为了提高热力性能，在上述一元流动设计的基础上，需要进一步用三元流动或准三元流动的方法来分析设计的合理性，提出改进措施。

此外，为了分析透平膨胀机中的两相流动，也要求知道通流部分内气体的三元流场，以便进一步探讨气流与液滴的相互作用。

本章就是为了上述目的而安排的。

2.1 复习一些数学知识

在直角坐标上的矢量 $\mathbf{A}$ 如图 2.1 所示。

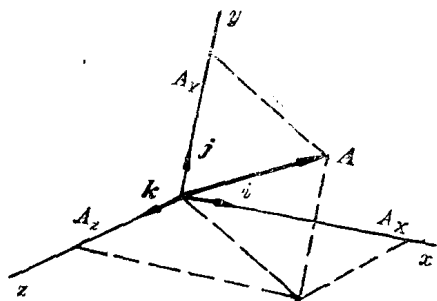


图 2.1 直角坐标上的矢量 $\mathbf{A}$

(1) 单位矢量点乘:

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = 0$$

(2) 矢量

$$\mathbf{A} = \mathbf{i}A_x + \mathbf{j}A_y + \mathbf{k}A_z$$

$$|\mathbf{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

(3) 矢量点乘:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$$

(4) 单位矢量叉乘、

$$\mathbf{i} \times \mathbf{i} = \mathbf{j} \times \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{k} = 0$$

$$\mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}, \mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i}, \mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j}$$

$$\mathbf{j} \times \mathbf{i} = -\mathbf{k}, \mathbf{k} \times \mathbf{j} = -\mathbf{i}, \mathbf{i} \times \mathbf{k} = -\mathbf{j}$$

叉乘后得到的新矢量方向可按右手规则确定。

(5) 矢量叉乘、

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \times \mathbf{B} &= (\mathbf{i}A_x + \mathbf{j}A_y + \mathbf{k}A_z) \times (\mathbf{i}B_x + \mathbf{j}B_y + \mathbf{k}B_z) \\ &= \mathbf{i}(A_y B_z - A_z B_y) + \mathbf{j}(A_z B_x - B_z A_x) \\ &\quad + \mathbf{k}(A_x B_y - B_x A_y) = -\mathbf{B} \times \mathbf{A} \end{aligned}$$

(6) Hamilton 算符

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

(7) 梯度——Hamilton 算符与标量的乘积

$$\nabla \Phi = \text{grad} \phi = \mathbf{i} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

(8) 散度——Hamilton 算符与矢量的点乘

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \text{div} \mathbf{A} = \left(\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$\begin{aligned} & \cdot (\mathbf{i}A_x + \mathbf{j}A_y + \mathbf{k}A_z) \\ &= \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \end{aligned}$$

(9) 旋度——Hamilton 算符与矢量的叉乘

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{A} &= \text{curl } \mathbf{A} = \text{Rot } \mathbf{A} = \left(\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \right) \\ &\quad \times (\mathbf{i}A_x + \mathbf{j}A_y + \mathbf{k}A_z) \\ &= \mathbf{i} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \mathbf{j} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \mathbf{k} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

(10) 标量积的梯度:

$$\begin{aligned} \nabla(ab) &= \mathbf{i} \frac{\partial(ab)}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial(ab)}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial(ab)}{\partial z} \\ &= a \left(\mathbf{i} \frac{\partial b}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial b}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial b}{\partial z} \right) \\ &\quad + b \left(\mathbf{i} \frac{\partial a}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial a}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial a}{\partial z} \right) \\ &= a \nabla b + b \nabla a \end{aligned}$$

(11) 标矢积的散度:

$$\nabla \cdot (\Phi \mathbf{A}) = \Phi \nabla \cdot \mathbf{A} + \nabla \Phi \cdot \mathbf{A}$$

(12) 标矢积的旋度:

$$\nabla \times (\Phi \mathbf{A}) = \Phi \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \Phi \times \mathbf{A}$$

(13) 叉乘的散度:

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot \mathbf{B} - (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{A}$$

(14) 叉乘的旋度:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) &= (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{A} - \mathbf{B} (\nabla \cdot \mathbf{A}) \\ &\quad + \mathbf{A} (\nabla \cdot \mathbf{B}) - (\mathbf{A} \cdot \nabla) \mathbf{B} \end{aligned}$$

(15) 旋度的散度: $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$