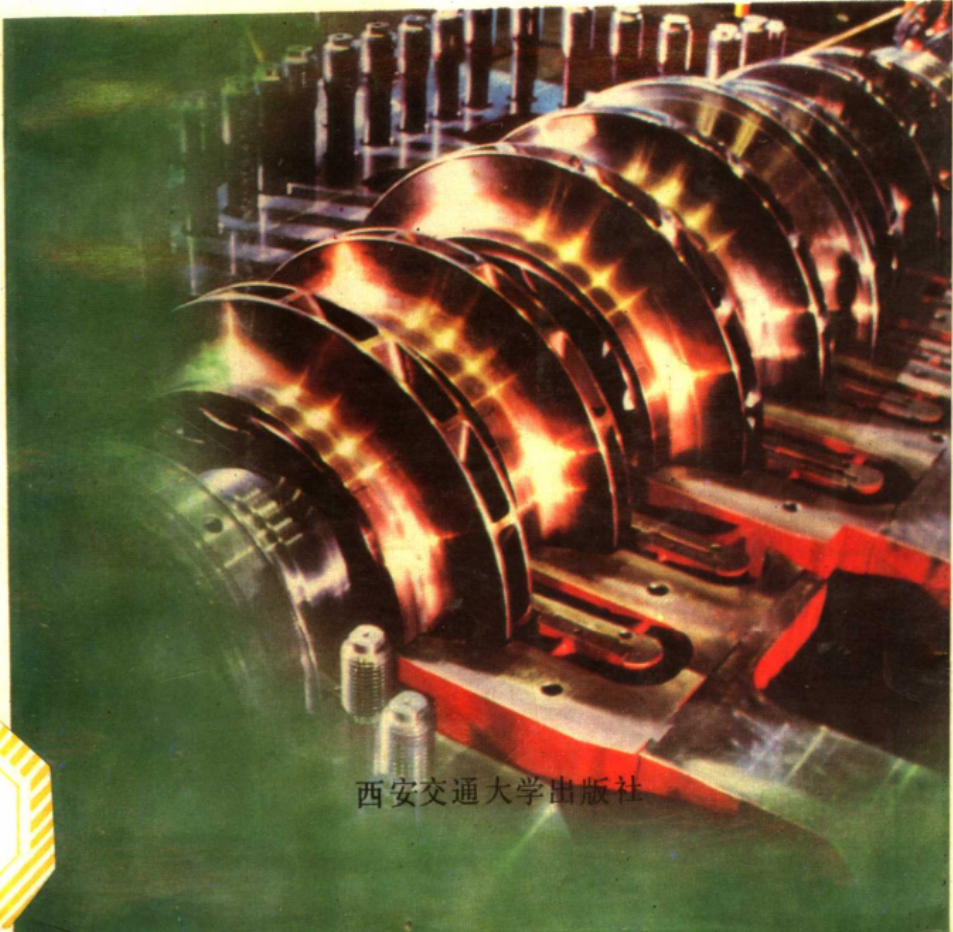


离心压缩机 三元流动理论及应用

节能转子设计基础

王尚锦 编著



西安交通大学出版社

离心压缩机
三元流动理论及应用
——节能转子设计基础

王尚锦 编著

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了离(向)心式、混流式流体机械节能型转子(三元叶轮)设计的气动、热力学基础,着重介绍出口相对宽度大于0.03的三元叶轮设计的理论基础。主要内容有三元流动基本方程组算子形式,它们在各类正交曲线坐标系下分量表达式及其常用数值解法(流线曲率法、边界元法)以及它们在节能转子设计中的应用。对国外广泛采用的“美国北方研究和工程公司”(NREC)三元叶轮设计法及我国自行开发的“全可控涡”三元叶轮设计法也作了较为详尽的介绍。

本书适于作为动力、化工、冶金、航空等有关压缩机、鼓风机、通风机、水轮机、水泵等专业本科高年级学生和研究生教材用,也可供上述各专业科研和设计工作者参考。

离心压缩机三元流动理论及应用 ——节能转子设计基础

编 著 王尚锦

责任编辑 孙文声

*

西安交通大学出版社出版

邮政编码 710049

西安电子科技大学印刷厂印装

陕西省新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 11.875 字数: 247千字

1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

印数: 1 ————1500

ISBN7-5605-0389-6/TK·38 定价: 3.25元

前 言

流体机械中的压缩机、鼓风机、通风机和水泵广泛应用于国民经济各部门，消耗着巨大的能量。机械工业部通用局1979年的统计资料表明，上述三机一泵在各行业的总装机容量占全国总发电量的34%。可见，在能源日益紧缺的现在和未来，利用新技术开发上述机械的节能产品，在国民经济建设中将占有重要地位。

透平式流体机械，长年以来由于测试技术和计算工具的限制，所采用的传统设计理论基本上是在一元流动假设下建立的。对于离心(包括径、混流)式流体机械而言，由经验及半经验关系式确定其流动效率及叶轮“滑动系数”(又称“滑移系数”)后，根据一元流动基本关系式，计算和确定各部件横断面上流体平均参数及其几何参数。对于轴流式流体机械，也仅限于在叶栅进、出口轴向间隙内，考虑到流动参数沿径向的变化，通过“简单径向平衡”计算，先确定各半径处基元叶栅¹⁾上的进、出口速度三角形，在选定原始叶型的前提下，再由大量平面叶栅吹风数据所得到的流动损失、落后角等一系列流动参数与叶栅几何参数间的实验曲线，确定叶栅的全部几何参数。此外，透平式流体机械所采用的其它工程设计方法，诸如“模化设计法”、“流道损失法”等也都是在一元流动

1) 当认为轴流式空间叶栅是由无数不同半径的圆柱面叶栅组成时，这一系列圆柱面叶栅即称之为基元叶栅。

假设(认为沿横断面流动参数均匀)下建立的。

诚然,迄今为止上述一元流动设计计算方法,对透平式流体机械的发展还在起着重要作用。然而自20世纪60年代以来,在机械制造工艺和测试技术长足进步的同时,电子计算机和计算技术的飞速发展和普及,使透平式流体机械的设计技术正在发生着巨大变革。这集中表现在设计计算中,突破了一元流动的近似假定,考虑了真实流动的空间(三元)性,采用了与真实流动更为接近的物理模型,利用电子计算机对相应的三元流动偏微分方程组进行数值求解,建立了空间流动参数与三元扭曲叶片几何参数间的定量关系。利用这类三元流动计算,结合一定的试验研究,以指导高性能透平式流体机械的设计。由于这一变化,世界各工业发达国家的透平式流体机械的节能水平获得了大幅度提高。

作者近20年来,结合上述理论计算和试验研究,在提高离心式压缩机、鼓风机的节能水平方面,作了一些微薄的工作。本书是作者在上述工作过程中,学习国内外有关参考文献,进行设计和研究的一些心得体会,也是作者和他的同事们承担“七五”计划国家经委“12条龙”项目中第7条龙——大型合成氨成套设备(含尿素装置)的子项目“节能压缩机转子”的理论总结。

透平式流体机械内部的真实流动是三元不均匀、非定常的粘性流动。我们已有的实践表明,当叶轮出口相对宽度 b_2/D_2 大于0.03时,采用主流区的三元、定常、无粘流动模型结合壁面附近的边界层理论模型,作为具有三元扭曲叶片的离心式压缩机、鼓风机设计方法的基础理论,再结合必要的试验研究,可以显著地降低它们的能耗(3~10%以上)。

然而，对于叶轮出口相对宽度 b_2/D_2 小于 0.02 的机器，欲大幅度降低能耗，必须采用三元全粘性(紊流)流动模型。

为了不局限于上述已有的设计理论和方法，让广大科技工作者能在各自工作的行业内创造出更新、更好的设计理论和方法，本书从透平式流体机械空间流动的基本理论开始讨论。考虑到近年来国外有关文献、教科书已出现用算子形式表达基本方程的趋势，为便于阅读和吸收之，本书在介绍空间流动基本方程式时，同时给出它们的标量形式和算子形式。

作者深刻地体会到，欲利用流体机械内空间流动基本方程式，有效地解决生产实际问题，必须对这些复杂方程式中各项数学符号的物理意义有尽可能深入的理解。理论和计算工作者熟悉这些方程式在各种不同坐标系下的数学表达式及其数值求解方法，但是往往很少去讨论表达式中各项数学符号的物理意义；工程技术人员对实际问题中的流动现象有较深入的了解，而对控制这些流动现象的数学方程式，尤其是在复杂坐标系下的表达式及其数值解法却掌握较少，甚至望而生畏。这一理论与实际的割裂现象，对提高我国透平式流体机械的科研和生产水平极为不利。因此，本书在讨论空间流动基本方程式时，尽可能地对方程式中出现的各种数学符号赋以实际的物理意义，着重讨论它们的物理本质，以便读者更深入地理解空间流动基本方程，并能更有效地应用这些理论开展节能型流体机械的设计和研发。

本书针对叶轮出口相对宽度 b_2/D_2 大于 0.03 的离心式压缩机，讨论节能型透平式流体机械设计的理论基础及其应用，主要讨论透平式流体机械内部三元流动基本方程组，并着重介绍当今国内外工业界广泛采用的是吴仲华流面理

论^[1]的物理模型及其数值解法(流线曲率法、边界元法)以及它们在离心式压缩机、鼓风机节能转子设计中的应用。为适应工院校本科生及广大工程技术人员的数学基础、在第一章预备知识中,还重点介绍了任意正交曲线坐标系下各微分算子的表达式、张量和并矢的基本概念、广义哈密尔顿算子、广义高斯定理和广义斯托克斯定理;为便于数学符号和物理意义间的沟通,作者在本章还提出了有关透平机械内部运动的两类描述方法和流体微团运动分解中各项偏导数的力学含义。第二章介绍了三元流动基本方程组的各种形式及其物理意义。第三章介绍了三元流动的重要解法之一——流线曲率法,重点介绍了国外各工业发达国家广泛使用的美国北方研究和工程公司(Northern Research and Engineering Corporation)法,还详细介绍了西安交通大学提出和发展的并在我国杭州制氧机厂作为设计规范的“全可控涡”三元叶轮设计方法及其应用。第四章结合“全可控涡”设计方法介绍了边界元方法及其应用。

本书在写作过程中,得到了我的老师程迺晋教授的热情鼓励和支持,我的学生席光博士、尚虹硕士在本书的校对、誊写、绘图中付出了巨大的劳动,在此一并表示衷心的感谢。

作者

1991年元月

于西安交通大学

目 录

前言

第一章 基础知识

§ 1-1 场的若干基本度量及其积分表达式 (1)

一、标量场的梯度 (2)

二、矢量场的散度 (6)

三、矢量场的旋度 (9)

§ 1-2 任意正交曲线坐标系下微分算子表达式 (11)

一、任意正交曲线坐标系 (11)

二、梯度在正交曲线坐标系中的表达式 (20)

三、散度在正交曲线坐标系中的表达式 (20)

四、旋度在正交曲线坐标系中的表达式 (22)

五、拉普拉斯算子在正交曲线坐标系中的表达式
..... (23)

§ 1-3 张量和并矢的概念 (24)

一、张量的基本概念 (24)

二、并矢的概念和运算 (30)

§ 1-4 广义哈密尔顿算子、广义高斯定理 和广义斯托克斯定理 (39)

一、广义哈密尔顿算子的引入 (39)

二、广义哈密尔顿算子基本性质 (45)

三、广义高斯定理 (47)

四、广义斯托克斯定理.....	(49)
§ 1-5 透平式流体机械流体动力学描述方法	
的若干特点.....	(53)
一、拉格朗日法和欧拉法.....	(53)
二、物理场在相对和绝对柱标系中的相互关系	
.....	(57)
§ 1-6 流体微团运动的分解及各速度分量沿各坐标方	
向导数的物理意义.....	(77)
一、直角坐标系下.....	(78)
二、柱坐标系下.....	(85)
三、位移张量分解的数学与物理含义.....	(94)
四、绝对与相对观察者的流体微团运动间关系	
.....	(101)
第二章 透平式流体机械三元流动基本理论	
§ 2-1 无粘流体三元流动基本方程组.....	(103)
一、雷诺输运定理.....	(103)
二、质量守恒方程式.....	(108)
三、牛顿第二定律表达式——动力学方程式...	(114)
四、无粘流体热力学第一定律表达式	
——能量守恒方程式.....	(131)
五、热力学第二定律表达式.....	(142)
六、状态方程式.....	(143)
七、无粘流体基本方程组的讨论.....	(148)
§ 2-2 粘性流体三元流动基本方程组.....	(157)
一、粘性流体动力学方程式.....	(157)
二、粘性流体能量方程式.....	(162)

三、粘性流体热力学第二定律表达式·····	(168)
§ 2-3 无粘流体三元流动速度势函数·····	(168)
一、静止叶栅内三元流动速度势方程·····	(169)
二、旋转叶栅内三元流动速度势方程·····	(172)
三、速度势方程的类型及其解法特点·····	(174)
§ 2-4 吴仲华三元流动普遍理论概述·····	(178)
一、相对流面上的流体流动·····	(179)
二、 S_2 流面流动分析基本方程·····	(183)
三、 S_1 流面流动分析基本方程·····	(186)
第三章 流线曲率法	
§ 3-1 流线曲率法及其基本方程·····	(191)
一、离心式压缩机子午面可压缩流动分析方程 ·····	(192)
二、透平式流体机械跨盘盖相对流面可压缩 流体流动分析的流线曲率法及其方程·····	(200)
三、跨叶片(S_1)流面流动分析流线曲率法 基本方程式·····	(212)
§ 3-2 跨盘盖相对流面流动分析的数值解法·····	(220)
一、有关相对流面参数的计算·····	(221)
二、流线各几何参数及 dW_m/dm 、 dW_θ/dm 的确定 ·····	(228)
三、速度分布方程式的数值积分和流量校核···	(230)
四、主要计算步骤·····	(233)
§ 3-3 “准三元流动”理论流线曲率法的“逆命题” ·····	(234)
一、W. Jansen 的规定叶片载荷法·····	(236)

二、混流式和离心式三元叶轮“全可控涡”设计方法	(248)
§ 3-4 “全可控涡”设计方法在离心式压缩机三元叶轮(节能转子)设计中的应用	(270)
一、径、混流式节能转子“考虑边界层厚度的全可控涡”设计方法	(271)
二、离心式空气压缩机 $b_2/D_2 = 0.1$ 模型级设计及其试验研究	(276)
三、重工质跨音离心压缩机 $b_2/D_2 = 0.033$ 模型级的设计与试验研究	(285)
四、“全可控涡”节能型制氧装置空压机整机的设计与试验	(290)
第四章 叶轮机械流体力学边界元方法	
§ 4-1 边界元方法的直接法	(297)
一、 δ 函数	(297)
二、边界积分方程的导出	(299)
三、边界积分方程的近似解法	(308)
§ 4-2 边界元方法的间接法	(315)
一、点源和点涡——基元流动	(316)
二、平面叶栅绕流	(318)
三、积分方程法、边界元素法在流体力学中发展	(325)
§ 4-3 任意回转面叶栅可压缩流动分析的边界元法	(328)
一、任意回转面可压缩流动的基本方程	(328)
二、 $R-\Theta$ 平面内流函数方程	(330)

三、由进口流量和预旋引起的特解 ϕ^* 及其诱导速度·····	(334)
四、由叶片涡引起的通解 ϕ_0 及其诱导速度···	(336)
五、 $R-\Theta$ 平面内的流动分析 ·····	(342)
六、回转面流动分析·····	(350)
§ 4-4 任意回转面薄翼叶栅可压缩流动分析	
边界元法·····	(351)
一、任意回转面流动基本方程·····	(352)
二、 $R-\Theta$ 映象平面流函数方程·····	(352)
三、通解——叶片涡的影响·····	(353)
四、线性代数方程组的生成·····	(357)
五、 $R-\Theta$ 平面及回转面内流动分析·····	(360)

参考文献

第一章 基础知识

本章主要介绍场的梯度、散度和旋度的积分定义式及其在一般正交曲线坐标系下的微分表达式；张量和并矢的基本概念；广义哈密尔顿算子、广义高斯定理和广义斯托克斯定理；物理场在相对与绝对柱坐标系中的关联以及流体微团运动的分解。上述讨论认定读者已掌握了工科院校矢量分析和场论的基本知识。

§ 1-1 场的若干基本度量及其积分表达式

透平式流体机械内空间流动理论是揭示该空间场内各气流参数变化规律的一门学科，场论是其基本的数学工具之一。在“矢量分析与场论”课程中，我们已学过场的梯度、散度和旋度的微分定义及其在直角坐标系下的表达式。但是叶轮机械流体动力学常使用柱坐标系或其它建立在流面上的正交曲线坐标系，近年来任意非正交曲线坐标系也开始广泛使用。实际上，反映物理现象某一本质的度量——物理量，是客观存在的，它不随坐标系的选择即坐标基的不同而改变。因此我们有必要进一步讨论场的各种度量的积分定义，以便在今后的讨论中，最大可能地略去繁琐的分量表达式的演算，利用积分定义式的坐标不变性，较方便地把握数学表达式及其演算的物理本质。

一、标量场的梯度

(一) 标量场梯度的积分定义式

我们已学过直角坐标系下标量场梯度定义的微分形式

$$\text{grad } \phi = \nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \mathbf{k} \quad (1-1)$$

式中 ϕ 为标量函数, \mathbf{i} , \mathbf{j} 和 \mathbf{k} 分别为直角坐标系 x , y 和 z 方向的单位坐标矢量。

在柱坐标系下, 该梯度矢量的微分表达式为

$$\text{grad } \phi = \nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{\partial \phi}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (1-2)$$

式中 \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_θ 和 \mathbf{e}_z 分别为柱坐标系径向 r , 周向 θ 和轴向 z 的单位坐标矢量。

由此可见, 该梯度矢量的微分形式将因坐标系而异。事实上, 梯度矢量还可以用积分形式定义。该形式与坐标系的选择无关, 往往能更直观地反映它的物理本质, 这时

$$\text{grad } \phi = \nabla \phi = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \oint_S \mathbf{n} \phi dS \quad (1-3)$$

Ⓟ

式中 V 表示包含空间某点 P 的任意形状空间体积, S 表示该空间体的边界面, \mathbf{n} 表示该边界面上某一微元面积 δS 的外法向单位矢量¹⁾ (如图 1-1 所示)。若用 $\delta \mathbf{S} = \mathbf{n} \delta S$ 表示有向曲面, 则上式也可写成

$$\text{grad } \phi = \nabla \phi = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \oint_S \phi d\mathbf{S} \quad (1-3a)$$

Ⓟ

1) 本书以外法向为正, 内法向为负。

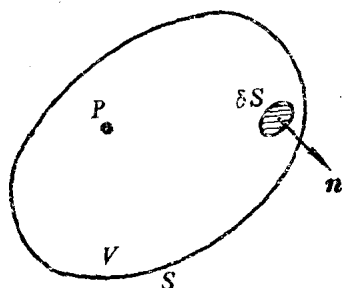


图 1-1 含 P 点的控制体 V

为了说明(1-3)式曲面积分的含义,如图 1-2 示,取过 P 点等值面 $\phi = c$, 该等值面正法向单位矢量 \mathbf{N} 指向 ϕ 增加方向, 并取该等值面上、下二个等值面 $\phi = c \pm \frac{\partial \phi}{\partial N} \delta N$ 为上、下底, 作一封闭的圆柱体, \mathbf{n} 为该圆柱表面的外法线单位矢量。

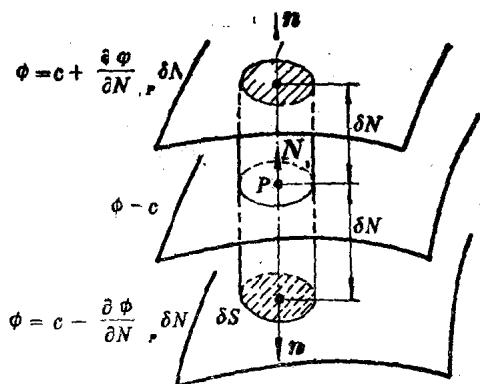


图 1-2 含 P 点的柱形控制体

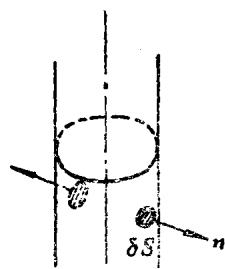


图 1-3 柱形控制体一对侧面微元面积

由图 1-3 可知, 对于圆柱面而言, 任一微元面积 $n\delta S$ 必有微元面积 $-n\delta S$ 与其相对, 且处于同一等值面上, 因此这一对微元面积关于 ϕ 的面积分为零, 故有

$$\begin{aligned}\oint_S n\phi dS &= \left(c + \frac{\partial\phi}{\partial N}\Big|_P \delta N\right) \delta S N + \left(c - \frac{\partial\phi}{\partial N}\Big|_P \delta N\right) \delta S (-n) \\ &= \left(2 \frac{\partial\phi}{\partial N}\Big|_P \delta N \delta S\right) N\end{aligned}$$

代入(1-3)式得

$$\begin{aligned}\text{grad } \phi|_P = \nabla\phi|_P &= \lim_{\delta N \rightarrow 0} \left(2 \frac{\partial\phi}{\partial N}\Big|_P \delta N \delta S\right) N / 2\delta N \delta S \\ &= \frac{\partial\phi}{\partial N}\Big|_P N\end{aligned}$$

或者, 一般而言

$$\text{grad } \phi = \nabla\phi = \frac{\partial\phi}{\partial N} N \quad (1-4)$$

(1-4)式表明, 按(1-3)式定义的矢量, 其方向与过 P 点等值面正法向 N 重合, 其模等于标量场 ϕ 在 P 点沿 N 方向变化率(方向导数)。可见该矢量就是梯度矢量, 与其微分定义式(1-1)等价。显然, 该定义式与坐标系无关。

图 1-4 清楚地告诉我们, 沿任意方向 PQ 标量函数 ϕ 的

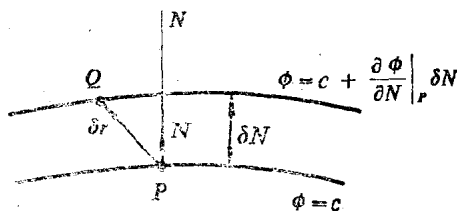


图 1-4 两个相邻点 ϕ 值

变化

$$\delta\phi = \frac{\partial\phi}{\partial N} \delta N = \frac{\partial\phi}{\partial N} \mathbf{N} \cdot \delta\mathbf{r} = \nabla\phi \cdot \delta\mathbf{r}$$

因此标量函数 ϕ 沿 PQ 方向的方向导数

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial l}\right)_{P, PQ} = \lim_{Q \rightarrow P} \frac{\delta\phi}{|PQ|} = \nabla\phi \cdot \lim_{Q \rightarrow P} \frac{PQ}{|PQ|} = \nabla\phi \cdot \mathbf{l} \quad (1-5)$$

式中 l 为 PQ 方向弧长, \mathbf{l} 为该方向单位向量。

(二) 梯度矢量的若干基本性质

关于梯度矢量, 有三条基本性质值得着重指出:

(1) 梯度矢量为一绝对矢量, 也就是说它与坐标系的选择无关。对于任一确定的标量场 ϕ , 不论采用哪种坐标系, 其梯度矢量 $\nabla\phi$ 的模和方向均不变。(1-3)式为梯度矢量的积分定义式。与其微分定义式(1-1)、(1-2)不同, 对任意坐标系均适用, 更利于表达其物理本质。由式(1-3)、(1-4)及图 1-2 清楚表明, 该梯度矢量是标量场不均匀性的度量, 封闭曲面积分 $\oint_S \mathbf{n}\phi dS$ 反映了以 S 为边界的控制体 V 内标量场 ϕ 的不均匀性。

(2) 由(1-1)式可知, 梯度矢量 $\nabla\phi$ 的三个分量正好是等值面 $\phi(x, y, z) = c$ 在该点法线的三个方向数, 因此梯度矢量 $\nabla\phi$ 的方向与等值面法向重合, 且指向 ϕ 增加的方向。而(1-4)式则更直观地表明了梯度矢量 $\nabla\phi$ 的这一基本性质。

(3) (1-5)式表明, 梯度矢量 $\nabla\phi$ 在任意方向 PQ 的投影即为标量函数 ϕ 在该方向的方向导数 $\frac{\partial\phi}{\partial l}$ 。显而易见, 只要已知标量函数 ϕ 过某点 P 的三个不共面方向的变化率(方