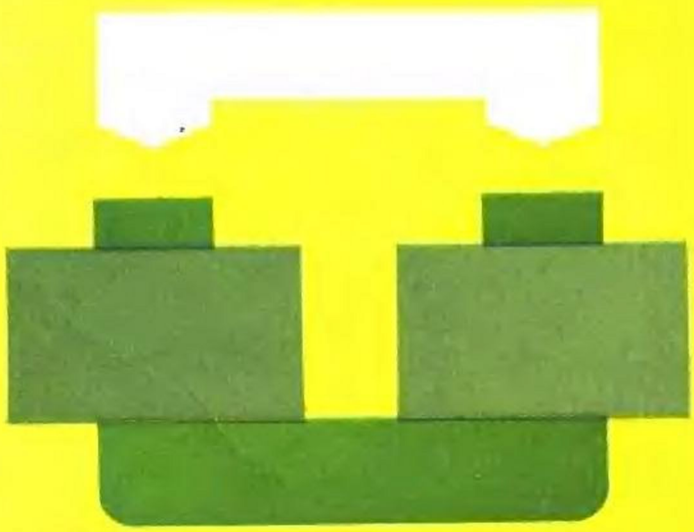
磁选设备

磁系设计基础



冶 金 工 业 出 版 社

磁选设备磁系设计基础

王常任　孙仲元　郑龙熙　编著

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书反映了作者多年教学、科研和生产实践的成果和经验。书中较系统地介绍了磁选设备所用的磁性材料及其特性、应用和选择，磁路计算的理论基础，磁选设备的磁系设计知识，并列举了典型磁选设备的磁路计算方法，还介绍了磁选生产、科研所用的不同类型线圈磁场强度的计算方法以及磁场的实验研究方法。

本书可供从事磁选科研、设计和生产的工程技术人员参考，亦可作为大专院校选矿专业教师、研究生及本科生的参考书。

磁选设备磁系设计基础

王常任　孙仲元　郑龙熙　编著

责任编辑　黄淦祥

*

冶金工业出版社出版发行

（北京北河沿大街嵩祝院北巷39号）

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 10 字数 263 千字

1990年11月第一版　1990年11月第一次印刷

印数00,001～1,000册

ISBN 7-5024-0732-4

TD·125 定价8.00元

前　言

磁选厂的生产技术发展与磁选设备的科研、生产发展水平有密切关系，这已为过去和现在的技术发展史所证实。为从事磁选科研、设计和生产的工程技术人员掌握磁选设备磁系设计方面的知识和技能的需要，编写了此书。

本书共分九章。书中系统介绍了磁选设备所用的磁性材料及其特性、应用和选择，磁路计算的理论基础，磁选设备的磁系设计知识，并列举了典型磁选设备的磁路计算方法，还介绍了磁选生产、科研所用的不同类型线圈磁场强度的计算方法，以及磁选设备的磁场的实验研究方法。介绍这些内容对从事磁选科研、设计和生产的工程技术人员了解与掌握磁选设备的磁系设计知识和技能可能有所帮助。

本书的第一、二、三、五、六和第八章由东北工学院王常任同志编写，第四章由中南工业大学孙仲元同志编写，第七和第九章由东北工学院郑龙熙同志编写，最后全书由王常任同志统一修改定稿。

本书可供从事磁选设备科研、设计和生产的工程技术人员参考，也可供冶金工科高等院校选矿专业的大学生和研究生学习参考。

在本书编写过程中，得到了有关单位和同志的支持与帮助，编者谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬希读者多多批评指正。

编者

1987年8月

目 录

第一章 场 论 基 础

在许多科学技术问题中，常常遇到各种场，例如电场、磁场、速度场、温度场和各种力场等。这些场的物理量虽然各不相同，但在数学关系上是有共性的。场论就是从概念上和数学关系来讨论场。具体来说，就是讨论场的概念、场的表示法、表示场的各种特性的数量以及它们的计算。这里简要介绍与磁系设计有关的场论知识。

第一节 矢 量 代 数

为了能顺利进行场的讨论和计算，把处理场的数学方法弄通是必要的。为此，有必要回忆一下有关的矢量代数知识。

一、矢量及其表示

矢量是一个既有大小又有方向的量。而标量是一纯量，只有大小而无方向。习惯上，我们采用右手系笛卡儿坐标系（见图1-1）。

如在三个互相垂直的轴上给出了三个分量A_x、A_y和A_z，则矢量$\vec{A}$就被确定了。矢量$\vec{A}$的矢量表达式为

$$\vec{A}=A_x\vec{i}+A_y\vec{j}+A_z\vec{k} \tag{1-1}$$

式中 $\vec{i}$，$\vec{j}$，$\vec{k}$——沿x，y，z坐标轴正向的单位矢量。

矢量$\vec{A}$的模为

$$A=|\vec{A}|=(A_x^2+A_y^2+A_z^2)^{1/2} \tag{1-2}$$

二、矢量和与矢量差

如有两个矢量$\vec{A}$和$\vec{B}$，则其和为

$$\vec{A}+\vec{B}=(A_x+B_x)\vec{i}+(A_y+B_y)\vec{j}$$

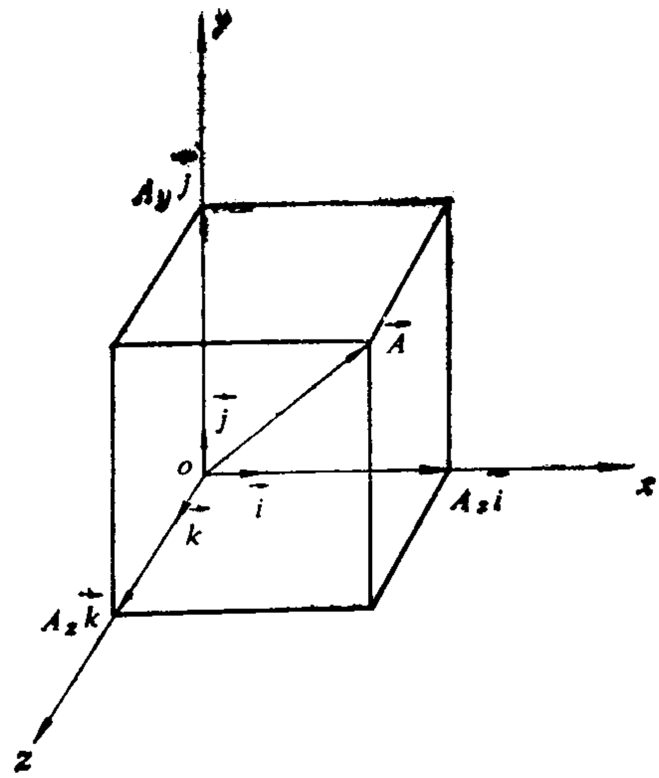


图 1-1　矢量及其分量

$$+(A_z+B_z)\vec{k} \tag{1-3}$$

而其差为

$$\vec{A}-\vec{B}=(A_x-B_x)\vec{i}+(A_y-B_y)\vec{j}$$
$$+(A_z-B_z)\vec{k} \tag{1-4}$$

三、两个矢量的标量积（点积）

定义　两个矢量的标量积是一个标量，它的大小等于两个矢量模的乘积，再乘以两个矢量间夹角的余弦，即

$$\vec{A}\cdot\vec{B}=|\vec{A}|\ |\vec{B}|\cos(\varphi-\theta) \tag{1-5}$$

从定义可知，算术中的乘法交换率对于标量积是适用的，即

$$\vec{A}\cdot\vec{B}=\vec{B}\cdot\vec{A} \tag{1-6}$$

单位矢量的标量积为：

$$\vec{i}\cdot\vec{i}=|\vec{i}|\ |\vec{i}|\cos0°=1$$
$$\vec{j}\cdot\vec{j}=\vec{k}\cdot\vec{k}=1$$

$$\vec{i}\cdot\vec{j}=|\vec{i}|\ |\vec{j}|\cos 90^\circ=0$$

$$\vec{j}\cdot\vec{i}=\vec{j}\cdot\vec{k}=\vec{k}\cdot\vec{j}=\vec{k}\cdot\vec{i}=\vec{i}\cdot\vec{k}=0 \qquad (1\text{-}7)$$

$\vec{A}\cdot\vec{B}$的分量表达式为：

$$\vec{A}\cdot\vec{B}=(A_x\vec{i}+A_y\vec{j}+A_z\vec{k})\cdot(B_x\vec{i}+B_y\vec{j}+B_z\vec{k})$$

$$=A_x\times B_x+A_y\times B_y+A_z\times B_z \qquad (1\text{-}8)$$

四、两个矢量的矢量积（叉积）

定义 $\vec{A}\times\vec{B}=\vec{C}$，$\vec{C}$的大小为

$$C=|\vec{C}|=|\vec{A}|\ |\vec{B}|\sin(\varphi-\theta) \qquad (1\text{-}9)$$

两个矢量的矢量积为第三个矢量，它的大小等于原来两个矢量的模的乘积再乘以两个矢量间夹角的正弦。它的方向和原来两个矢量所在平面相垂直，而且这三个矢量的指向符合右手系（见图1-2）。矢量积不服从交换率，因为把$\vec{A}$和$\vec{B}$的顺序颠倒以后，$\vec{C}$的方向也倒过来了，所以

$$\vec{A}\times\vec{B}=-(\vec{B}\times\vec{A})$$

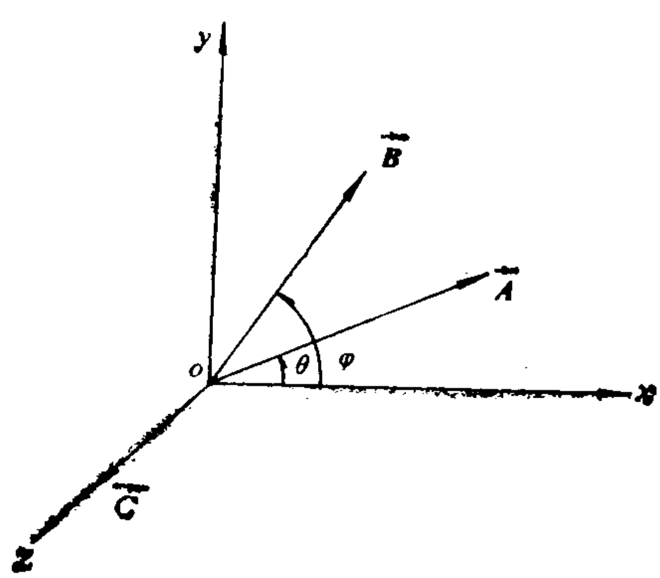


图 1-2 $\vec{A}$和$\vec{B}$不垂直时的矢量积$\vec{A}\times\vec{B}$

单位矢量的矢量积为：

$$\vec{i} \times \vec{i} = |i|\ |i| \sin 0° = 0$$

$$\vec{j} \times \vec{j} = \vec{k} \times \vec{k} = 0$$

$$\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k},\quad \vec{j} \times \vec{i} = -\vec{k}$$

$$\vec{j} \times \vec{k} = \vec{i},\quad \vec{k} \times \vec{j} = -\vec{i}$$

$$\vec{k} \times \vec{i} = \vec{j},\quad \vec{i} \times \vec{k} = -\vec{j} \tag{1-10}$$

$\vec{A} \times \vec{B}$的分量表达式为

$$\begin{aligned}\vec{A} \times \vec{B} &= (A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k}) \\ &\quad \times (B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k}) \\ &= (A_y B_z - A_z B_y)\vec{i} + (A_z B_x - A_x B_z)\vec{j} \\ &\quad + (A_x B_y - A_y B_x)\vec{k} \\ &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}\end{aligned} \tag{1-11}$$

第二节　场的概念及其表示

一、场的概念

某一物理量在空间的分布称为“场”。例如电场强度在空间的分布称为电场，磁场强度在空间的分布称为磁场。这里的空间可以是二维的，也可以是三维的。三维空间就是我们通常说的空间，二维空间是指平面。讨论场时，定义中的空间可以是整个空间，也可以是空间的一部分。

二、场的分类

1．数量场和矢量场

（1）数量场（标量场）　如果一个物理量是数量，这个物理量在空间的分布就是数量场。例如，温度、密度和电位是数量，所以温度场、密度场和电位场是数量场。

（2）矢量场　如果一个物理量是矢量，这个物理量在空间的分布就是矢量场。例如，力、电场强度和磁场强度是矢量，所以力场、电场和磁场是矢量场。

2．稳定场和不稳定场

（1）稳定场（定常场）　如果一个场不随时间变化，就称为这种场为稳定场。恒定磁场磁选机的场就属于这种场。

（2）不稳定场（不定常场）　如果一个场随时间变化，就称这种场为不稳定场。交变磁场磁选机的场就属于这种场。由于不稳定场在一时刻的瞬时状态可以看成是一个稳定场，所以，对稳定场的结果一般也适用于不稳定场在一瞬时的状态。

三、场的表示

1．数学表示

在数学上通常用函数表示场。

（1）数量场　设M为空间某一点，t为时间，u为场的物理量（数量），则数量场可表示为：

$$u=u(M,t) \tag{1-12}$$

这一表示就是说，在空间某一点M，每一时刻t都有一定的u值。如果选取直角坐标系，场空间为稳定场且为三维的，此时数量场又可表示为

$$u=u(x,y,z) \tag{1-13}$$

（2）矢量场　设$\vec{A}$为场的物理量（矢量），则矢量场可表示为

$$\vec{A}=\vec{A}(M,t) \tag{1-14}$$

如果选取直角坐标系且场空间为稳定场，此时矢量场可表示为

$$\vec{A}=\vec{A}(x,y,z) \tag{1-15}$$

2．直观表示

在场论中常用直观表示法表示数量场的等值线（或等值面）和矢量场的矢量线。

第三节 梯　　度

一、数量场的方向导数

1．定义

从数量场$u=u(M)$中任一点M_0出发，引出一射线l，再在l上任取一点M，把$\overline{M_0M}=\rho$，如果$M\to M_0$时，比式

$$\frac{\Delta u}{\rho}=\frac{u(M)-u(M_0)}{\overline{M_0M}}$$

的极限存在，则称此极限值

$$\left.\frac{\partial u}{\partial l}\right|_{M_0}=\lim_{M\to M_0}\frac{u(M)-u(M_0)}{\overline{M_0M}} \tag{1-16}$$

为函数$u(M)$在M_0处沿l方向的方向导数。

从定义可知，方向导数就是函数$u(M)$在一个点处沿某一方向对距离的变化率。方向导数的性质和偏导数类似。例如，$\frac{\partial u}{\partial l}>0$时，函数$u$就沿$l$方向增大；$\frac{\partial u}{\partial l}<0$时，函数$u$就沿$l$方向减少。

2．在直角坐标系中方向导数的计算公式

设函数$u=u(x, y, z)$在$M_0(x_0, y_0, z_0)$处可微分和$\cos\alpha$，$\cos\beta$，$\cos\gamma$为l方向上的余弦，则函数u在M_0点的方向导数必然存在且可从以下公式给出

$$\frac{\partial u}{\partial l}=\frac{\partial u}{\partial x}\cos\alpha+\frac{\partial u}{\partial y}\cos\beta+\frac{\partial u}{\partial z}\cos\gamma \tag{1-17}$$

二、梯度

方向导数给我们解决了函数$u(M)$在给定点处沿某一方向的变化率问题，一般说来，在同一点处沿不同方向的方向导数是不同的，可能有无穷个方向导数，那么，它在哪个方向上最大呢？又是多少呢？这是一个重要的问题。

1．定义

如果在数量场$u(M)$中的M点处存在这样一个矢量$\vec{G}$，它的方向为函数$u(M)$在M点处方向导数最大的方向，它的模也正好是这个最大方向导数的数值，则称矢量$\vec{G}$为函数$u(M)$在M点处的梯度。

2．在直角坐标系中梯度的计算公式

$$\begin{aligned}\mathrm{grad}u&=\frac{\partial u}{\partial x}\vec{i}+\frac{\partial u}{\partial y}\vec{j}+\frac{\partial u}{\partial z}\vec{k}\\&=\left\{\frac{\partial u}{\partial x},\ \frac{\partial u}{\partial y},\ \frac{\partial u}{\partial z}\right\}\end{aligned}\tag{1-18}$$

为了方便起见，常把上式写成$u(M)$和哈米尔顿算符（∇）的乘积。在直角坐标系中，

$$\nabla\equiv\vec{i}\frac{\partial}{\partial x}+\vec{j}\frac{\partial}{\partial y}+\vec{k}\frac{\partial}{\partial z}\tag{1-19}$$

算符∇是一个矢量形式的微分算子，只有在运算时才有意义。取∇和$u(M)$的乘积，可得$u(M)$的梯度：

$$\nabla u=\vec{i}\frac{\partial u}{\partial x}+\vec{j}\frac{\partial u}{\partial y}+\vec{k}\frac{\partial u}{\partial z}\tag{1-20}$$

必须指出，在数量场中梯度有一重要性质，即数量场中每一点M处的梯度垂直于过该点的等位面且指向函数$u(M)$增大的方向。还要指出，在下列情况下梯度的概念才可用在矢量场中，即在矢量场中选定了这样一些特定的方向，在这些方向上场矢量（如磁场强度）具有同一方向。在此方向上场矢量对距离的变化率可看做是场数量对距离的变化率，而且变化率值又最大。

各种磁选机的磁场梯度近似值见表1-1。

第四节 散　度

一、磁通量

定义　设有磁场$\vec{B}(M)$，沿场中某一有向曲面S的曲面积分

$$\phi_m=\iint_s \vec{B}\cdot d\vec{S} \tag{1-21}$$

叫做磁场$\vec{B}(M)$向正侧穿过曲面S的磁通量。

表 1-1 各种磁选机的特性

磁选机类型	聚磁介质	有关磁参数的近似值（颗粒直径≤磁力程）		
		力程，m	场强，A/m	磁场梯度，T/m
筒式磁选机	—	0.05	40×10^3	5
戴维斯磁选管	—	0.01	320×10^3	40
弗兰茨等磁力分析仪	—	0.01	800×10^3	20
琼斯型强磁选机	齿　板	0.001	1600×10^3	2000
科姆-马斯顿型高梯度磁选机	钢　毛	0.0001	1600×10^3	20000

二、磁感强度的散度

1．磁感强度散度的概念

从通过闭合曲面的磁通量问题来引进散度的概念。设$\vec{B}(M)$为磁场，M为磁场$\vec{B}$中的任何一点，S为围绕M点的一个封闭曲面，$\vec{n}$为曲面S的外法线方向，Ω为曲面S包围的空间区域，则通过曲面S的磁通量为

$$\phi_m=\iint_s \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

如果闭曲面S取定了外法线，这就规定了磁通流出为“+”，流入为“-”。通常对于磁场中的闭曲面，磁通总是有流出也有流入，总磁通ϕ_m是流出的磁通量减去流入的磁通量。可以有以下三种情况：

1）$\phi_m>0$表明闭曲面S内部有“源”，它散发出磁通，也可以说S内有正源；

2）$\phi_m<0$表明S内部有“洞”，磁通从“洞”漏掉，也可以说S内有负源；

3）$\phi_m=0$表明总体来说磁通的流出、流入达到平衡。说明

S内部无源无洞。

通过磁通量的计算，只知道闭合曲面S内部有正源或负源，或无源无洞，还不能了解源在S内部的分布情况和源的强弱程度。为了研究这一问题，我们引入磁场的散度概念。

散度的定义 设有磁场$\vec{B}(M)$，在磁场中作包围M点的闭曲面S，S包围的区域为Ω，Ω的体积为ΔV。如当Ω收缩到M时，比值

$$\frac{\Delta\phi_m}{\Delta V}=\frac{\iint_s \vec{B}\cdot d\vec{S}}{\Delta V} \tag{1-22}$$

的极限存在，则称此极限为$\vec{B}(M)$在M点处的散度，即

$$\operatorname{div}\vec{B}=\lim_{\Omega\to M}\frac{\iint_s \vec{B}\cdot d\vec{S}}{\Delta V} \tag{1-23}$$

磁感强度的散度是标量。也可以有以下三种情况：

1）在M点处，如果$\operatorname{div}\vec{B}>0$，则$M$点是散发磁通量的“源”（正源）；

2）如果$\operatorname{div}\vec{B}<0$，则$M$点是吸收磁通量的“洞”（负源）；

3）如果$\operatorname{div}\vec{B}=0$，则表示$M$点既不散发磁通量也不吸收磁通量，或说既不是“源”也不是“洞”。

量$|\operatorname{div}\vec{B}|$表示散发或吸收磁通量的强度。

2．在直角坐标系中磁感强度散度的计算公式

$$\operatorname{div}\vec{B}=\frac{\partial B_x}{\partial x}+\frac{\partial B_y}{\partial y}+\frac{\partial B_z}{\partial z} \tag{1-24}$$

用哈密尔顿算符表示为

$$\nabla\cdot\vec{B}=\operatorname{div}\vec{B}=\left(\vec{i}\frac{\partial}{\partial x}+\vec{j}\frac{\partial}{\partial y}+\vec{k}\frac{\partial}{\partial z}\right)$$

$$\cdot(B_x\vec{i}+B_y\vec{j}+B_z\vec{k})$$

$$=\left\{\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right\}\cdot\{B_x, B_y, B_z\}$$

$$=\frac{\partial B_x}{\partial x}+\frac{\partial B_y}{\partial y}+\frac{\partial B_z}{\partial z} \tag{1-25}$$

恒定磁场磁选机的磁场，永远是$\nabla\cdot\vec{B}=0$（无散场，也是无源场）。这是这种磁场的重要性质。

第五节 旋　　度

一、磁感强度的环量和环量密度

磁感强度环量的定义　设有磁场$\vec{B}(M)$，则沿着场中某一闭曲线 l 的曲线积分

$$\Gamma=\oint_l \vec{B}\cdot d\vec{l} \tag{1-26}$$

叫做磁场$\vec{B}$沿曲线 l 按所取方向的环量。

磁感强度环量密度的定义　设有磁场$\vec{B}(M)$，在场中任一M点附近做一闭曲线 l，再以 l 为边界做一通过M点的曲面ΔS。l 的正方向取作和$\vec{n}$（$\vec{n}$为ΔS在M点处的法矢量）符合右手关系。当 l 沿曲面ΔS以任意方向收缩到M点时，比值

$$\frac{\Gamma}{\Delta S}=\frac{\oint_l \vec{B}\cdot d\vec{l}}{\Delta S} \tag{1-27}$$

的极限存在，则称此极限值为$\vec{B}(M)$在M点处的环量密度，即

$$\left.\frac{\Gamma}{\Delta S}\right|_M=\lim_{\Delta S\to M}\frac{\oint_l \vec{B}\cdot d\vec{l}}{\Delta S} \tag{1-28}$$

二、磁感强度的旋度

1．*定义*

如在磁场$\vec{B}(M)$中的一点M处存在这样一个矢量$\vec{R}$，它的方向是$\vec{B}(M)$在M点处环量密度最大的方向，它的模是这个最大的

环量密度值，则称矢量$\vec{R}$为磁场$\vec{B}(M)$在M点处的旋度。

2. 在直角坐标系中磁感强度旋度的计算公式

$$\mathrm{rot}\,\vec{B}=\left(\frac{\partial B_z}{\partial y}-\frac{\partial B_y}{\partial z}\right)\vec{i}+\left(\frac{\partial B_x}{\partial z}-\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)\vec{j}$$

$$+\left(\frac{\partial B_y}{\partial x}-\frac{\partial B_x}{\partial y}\right)\vec{k}$$

$$=\begin{vmatrix}\vec{i} & \vec{j} & \vec{k}\\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z}\\ B_x & B_y & B_z\end{vmatrix} \tag{1-29}$$

用哈密尔顿算符表示为

$$\nabla\times\vec{B}=\mathrm{rot}\,\vec{B}=\left(\vec{i}\frac{\partial}{\partial x}+\vec{j}\frac{\partial}{\partial y}+\vec{k}\frac{\partial}{\partial z}\right)$$

$$\times(B_x\vec{i}+B_y\vec{j}+B_z\vec{k})$$

$$=\left\{\frac{\partial}{\partial x},\ \frac{\partial}{\partial y},\ \frac{\partial}{\partial z}\right\}\times\{B_x,\ B_y,\ B_z\}$$

$$=\left(\frac{\partial B_z}{\partial y}-\frac{\partial B_y}{\partial z}\right)\vec{i}+\left(\frac{\partial B_x}{\partial z}-\frac{B_z}{\partial x}\right)\vec{j}$$

$$+\left(\frac{\partial B_y}{\partial x}-\frac{\partial B_x}{\partial y}\right)\vec{k} \tag{1-30}$$

恒定磁场磁选机的磁场，$\nabla\times\vec{B}=0$（无旋场）。这是这种磁场的重要性质。

第六节 标量磁位和矢量磁位

一、标量磁位

如果所研究的磁场是在没有电流的区域中，无疑，$\vec{B}$或$\vec{H}$的