

# 磁场参数测量器具

〔苏〕Ю. В. 阿法拉谢耶夫 等著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书对磁场参数测量器具的工作原理和设计制造做了全面而系统的论述。全书的内容分为三大部分。第一部分介绍了各类磁学量的量具,包括磁感应强度量具、磁通量具、磁矩量具和磁感应梯度量具。第二部分介绍了各类磁测量变换器和仪器,包括磁力仪器、量子仪器、电磁仪器、感应仪器、铁磁探头型仪器、超导仪器和磁光仪器。第三部分讨论了磁场参数测量器具的计量问题,包括磁学量单位的基准、单位量值的传递系统和传递方法等。书中在论述每一个问题时,除详细介绍量具或仪器的工作理论之外,还列举了若干实例及许多有用的实验数据。

本书可供从事原子物理、地球物理、宇航工程、电力、电机、雷达、通信、广播、电视、电子计算机、自动控制、仪器仪表及电磁计量等方面工作的科技人员阅读,也可供高等院校相应专业的师生参考。

Ю. В. Афанасьев и др.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ленинград «Энергия» ленинградское отделение, 1979

### 磁场参数测量器具

[苏] Ю. В. 阿法拉谢耶夫 等 著

张 伦 译

责任编辑 魏 玲 李 立

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1983 年 6 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1983 年 6 月第一次印刷 印张: 10 7/8

印数: 0001—5,400 字数: 281,000

统一书号: 15031·500

本社书号: 3102·15—8

定价: 2.00 元

## 译者序

本书系根据1979年苏联出版的“Средства измерений параметров магнитного поля”一书翻译而成。

众所周知，磁场参数测量是测量技术中的一个重要分支。随着现代科学技术的迅速发展，磁测量技术除在电子技术领域中获得极其广泛的应用之外，同时也深入到其他许多科技领域，如原子物理、地球物理、宇航工程、生物、医学、国防工程等。然而，迄今为止，国内还未出版过一本全面而系统地论述磁测量的方法和器具的书，本书的翻译出版对测量技术的这一分支领域将会是大有裨益的。

本书分三大部分对磁场参数测量器具进行详细的讨论。第一部分介绍了各类磁学量的量具，包括磁感应强度量具、磁通量具、磁矩量具和磁感应梯度量具。第二部分介绍了各类磁测量变换器（传感器）和仪器，包括磁力仪器、量子仪器、电磁仪器、感应仪器、铁磁探头型仪器、超导仪器和磁光仪器。第三部分讨论了磁场参数测量器具的计量问题，包括磁学量单位的基准、单位量值的传递系统和传递方法、传递误差分析等。因此，本书乃是从统一的观点对磁测量技术进行综合的论述，即系统地讨论了磁场的产生、测量和量值传递三个方面的问题。这对于读者深入了解磁测量技术的全貌是很有益处的。

本书的主要特点是内容丰富、取材新颖、叙述的物理概念比较清楚。另外一个特点是理论与实际应用密切结合。书中在介绍每一类量具或仪器时，一般都指出了它们的主要技术特性和适用范围，并列举了若干实例。

应当指出，本书系由苏联列宁格勒全苏门捷列夫计量科学研究院磁测量研究室的许多成员共同编写，代表了苏联的磁测量技

术水平。书中引用的一些材料对于促进我国的磁测量技术发展将起到积极的作用。

本书译文的八—十四章及第七章中的一部分承成都电讯工程学院张世箕教授校阅,译者在此表示衷心的感谢。

限于译者水平,译文中错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

## 前 言

按照不同物理原理制成的磁测量器具已获得广泛应用,这样,无论在国内(指苏联——译注)还是在外国都出版了一些论述这类器具的理论、计算和设计的专著。例如,Н. М. Померанцев, В. М. Рыжков 和 Г. В. Скроцкий 编写的《量子测磁学的物理基础》; А. Кобус 和 Я. Тушинский 编写的《霍尔传感器和磁阻器》及 Ю. В. Афанасьев 编写的《铁磁探头》便属于这类专著。

此外,从统一的观点来综合研究现有的磁测量方法和器具的书籍还很少见,而系统地论述包括下述几个内容的书籍则还缺乏,如:(1)磁测量的现代计量保证原理;(2)有关磁学量单位的基准和标准量具的知识;(3)估算误差和鉴定量具及测量仪器的推荐方法。本书的目的便是要弥补这个空白。

本书是列宁格勒全苏门捷列夫计量科学研究院磁测量室成员的集体成果。具体分工如下:绪论由 Ю. В. Афанасьев 和 Е. Н. Чечурина 撰写;第一、二、三章由 В. Н. Хорев 撰写;第四、八、九章由 Ю. В. Афанасьев 撰写;第五、七、十一章及 12-4、13-6 和 14-6 各节由 А. П. Шелкин 撰写;第六章和 13-1、13-2、13-4、13-5 及 13-7 各节由 Н. В. Студицов 撰写;第十二章和 8-5、14-5 节由 Е. Н. Чечурина 撰写;第十章由 В. М. Мирошников 撰写;6-4、14-1 到 14-4 各节由 В. Я. Шифрин 撰写;13-3、14-7 节由 В. Е. Чернышев 撰写;7-1 节由 С. И. Соловьев 撰写。

作者谨向 С. А. Спектор 表示衷心感谢,在本书准备付印时,承蒙他提出了许多宝贵意见。

对本书的意见和要求请寄列宁格勒火星广场 1 号《动力》出版社分社。

作者

• iii •

# 目 录

译者序

前言

|                   |   |
|-------------------|---|
| 绪论                | 1 |
| B-1 简短的历史回顾       | 1 |
| B-2 电磁场方程         | 2 |
| B-3 磁学量、被测参数和测量单位 | 5 |

## 第一编 磁学量量具

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第一章 计算磁学量量具的原理        | 13 |
| 1-1 概论                | 13 |
| 1-2 用级数形式表示具有轴对称分布的磁场 | 14 |
| 1-3 载流圆环              | 17 |
| 1-4 截面尺寸很大的圆形绕组       | 19 |
| 1-5 椭圆积分的应用           | 23 |
| 1-6 具有矩形线匝的绕组         | 25 |
| 1-7 线圈的综合方法           | 30 |
| 第二章 磁感应强度量具           | 36 |
| 2-1 预备知识              | 36 |
| 2-2 载流回路系统            | 37 |
| 2-3 绕组厚度很小的螺线管        | 46 |
| 2-4 产生强场的补偿线圈         | 51 |
| 2-5 磁感应强度量具的其他形式      | 57 |
| 第三章 磁通量具、磁矩量具和磁感应梯度量具 | 61 |
| 3-1 磁通量具              | 61 |
| 3-2 磁矩量具              | 67 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| 3-3 磁感应梯度量具 ..... | 75 |
|-------------------|----|

## 第二编 变换器和仪器

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第四章 磁测量变换器和仪器的一般理论 .....            | 80  |
| 4-1 根据所利用的物理现象或效应对变换器和仪器进行分类 ...    | 80  |
| 4-2 根据被测参数或被测的量的形式对变换器和仪器进行分类 ..... | 85  |
| 4-3 变换器和仪器的特性与参数 .....              | 90  |
| 4-4 使仪器误差最小的方法简介 .....              | 98  |
| 第五章 磁力仪器 .....                      | 106 |
| 5-1 磁力变换器 .....                     | 106 |
| 5-2 确定磁感应强度矢量方向的仪器 .....            | 111 |
| 5-3 测量均匀恒定场磁感应强度的磁强计 .....          | 113 |
| 5-4 非定向性磁强计及其应用 .....               | 117 |
| 5-5 变感器 .....                       | 121 |
| 第六章 量子仪器 .....                      | 126 |
| 6-1 磁共振 .....                       | 126 |
| 6-2 基于自由核子进动的仪器 .....               | 127 |
| 6-3 基于强迫核进动或强迫电子进动的仪器 .....         | 132 |
| 6-4 基于原子“光抽运”的仪器 .....              | 138 |
| 第七章 电磁仪器 .....                      | 147 |
| 7-1 电磁变换器 .....                     | 147 |
| 7-2 磁感应强度的模值和各个分量的测量 .....          | 155 |
| 7-3 磁感应强度矢量方向的确定 .....              | 159 |
| 7-4 非均匀磁场参数的测量 .....                | 163 |
| 7-5 磁动势的测量 .....                    | 169 |
| 7-6 恒定场的电磁磁强计 .....                 | 173 |
| 7-7 交变正弦场的电磁磁强计 .....               | 179 |
| 第八章 感应仪器 .....                      | 186 |
| 8-1 变换的普遍方程 .....                   | 186 |
| 8-2 无源变换器 .....                     | 188 |
| 8-3 带有积分装置的仪器·韦伯仪 .....             | 190 |

|                            |                                 |            |
|----------------------------|---------------------------------|------------|
| 8-4                        | 测试发电机 .....                     | 194        |
| 8-5                        | Barnett 发电机 .....               | 197        |
| 8-6                        | 单极发电机 .....                     | 198        |
| 8-7                        | 具有振动感应变换器的仪器 .....              | 199        |
| 8-8                        | 测量磁场非均匀性参数的仪器 .....             | 203        |
| <b>第九章 铁磁探头型仪器 .....</b>   |                                 | <b>206</b> |
| 9-1                        | 铁磁感应变换器 .....                   | 206        |
| 9-2                        | 铁磁探头的参数理论 .....                 | 208        |
| 9-3                        | 关于利用参数谐振来提高铁磁探头灵敏度的问题 .....     | 214        |
| 9-4                        | 铁芯形状的选择, 单分量、二分量和三分量的铁磁探头 ..... | 219        |
| 9-5                        | 铁磁探头的噪声 .....                   | 228        |
| 9-6                        | 测量恒定磁场参数的仪器 .....               | 235        |
| 9-7                        | 测量交变磁场参数的仪器 .....               | 238        |
| 9-8                        | 测量磁场非均匀参数的仪器 .....              | 240        |
| <b>第十章 基于超导效应的仪器 .....</b> |                                 | <b>244</b> |
| 10-1                       | 超导效应 .....                      | 244        |
| 10-2                       | 超导变换器 .....                     | 248        |
| 10-3                       | 测量恒定磁场参数和交变磁场参数的仪器 .....        | 256        |
| <b>第十一章 磁光仪器 .....</b>     |                                 | <b>260</b> |
| 11-1                       | 法拉第磁光效应和克尔磁光效应 .....            | 260        |
| 11-2                       | 磁光磁强计 .....                     | 262        |

### 第三编 计量保证的方法和器具

|                                 |                             |            |
|---------------------------------|-----------------------------|------------|
| <b>第十二章 保证磁场参数测量统一的原理 .....</b> |                             | <b>270</b> |
| 12-1                            | 概述 .....                    | 270        |
| 12-2                            | 磁感应强度测量器具的检定系统 .....        | 271        |
| 12-3                            | 磁通测量器具的检定系统 .....           | 280        |
| 12-4                            | 磁矩、导磁率和磁化强度的测量器具的检定系统 ..... | 281        |
| 12-5                            | 磁测量器具的检定和国家试验 .....         | 286        |
| 12-6                            | 估计磁场参数测量器具误差的一般方法 .....     | 287        |
| <b>第十三章 磁学量单位的基准 .....</b>      |                             | <b>291</b> |
| 13-1                            | 复现磁学量单位的原理和方法 .....         | 291        |

|                     |                                           |     |
|---------------------|-------------------------------------------|-----|
| 13-2                | 磁感应强度的国家主基准 .....                         | 293 |
| 13-3                | 交变场磁感应强度单位的国家专用基准 .....                   | 297 |
| 13-4                | 在 0.1—1.2 特斯拉范围内,磁感应强度单位的国家专用基<br>准 ..... | 300 |
| 13-5                | 磁通单位的国家主基准 .....                          | 303 |
| 13-6                | 磁矩单位的国家主基准 .....                          | 304 |
| 13-7                | 在 0.01—30 兆赫频段内,磁场强度单位的国家专用基准 ...         | 306 |
| 第十四章 检定的方法和器具 ..... |                                           | 309 |
| 14-1                | 弱磁感应强度测量器具的计量保证 .....                     | 309 |
| 14-2                | 固定式磁感应强度量具的检定 .....                       | 313 |
| 14-3                | 高精度微特斯拉仪的检定 .....                         | 315 |
| 14-4                | 测量中强磁感应强度的磁强计的检定 .....                    | 317 |
| 14-5                | 磁通测量器具的检定 .....                           | 318 |
| 14-6                | 磁矩量具的检定 .....                             | 323 |
| 14-7                | 交变场磁感应强度测量器具的检定 .....                     | 326 |
| 参考文献 .....          |                                           | 330 |

# 绪 论

## B-1 简短的历史回顾

对实际中的磁现象进行观察和利用是人类最古老的知识领域之一。例如，中国人大概很早就知道存在有地磁场。远在公元前三世纪，他们就使用了磁罗盘。这种磁罗盘由两部分组成：一是带有用磁铁矿制成的短臂的圆勺；二是具有分度的磨光铜片，圆勺便固定在它上面。圆勺可以在铜片上自由转动，指南或指北的短臂可作为磁针的原形。后来，经过改进的磁罗盘在东方世界首先被用到陆地旅行，然后又用于航海事业。在欧洲，罗盘只在17世纪才为人所知晓。

直到18世纪末，所有的地磁观察都归结为测量磁偏角和磁倾角。只是在1785年，库仑才提出通过确定磁棒或磁针绕支撑点自由振动的周期来测量地磁场强度的方法<sup>[102]</sup>。

1832年，高斯发表了题为“折算为绝对量度的地磁力强度”的论文，从而开创了测磁学的新时代。在该文中，高斯指出有可能依据测量长度、质量和时间来绝对确定磁场强度的大小。有关相互联系的测量单位制的问题被首次提出，这对计量学、特别是对物理量的测量单位的学说产生了重大影响。随后，以长度、质量和时间为基础的物理量的单位制便称为绝对单位制。因此，磁测量对于单位制学说的发展起了相当大的推动作用。

在革命前的俄国，地磁测量是利用从国外进口的仪器以及利用根据私人设计、主要是根据科学院士维尔特（Вильд）的设计所制成的仪器来完成。然而，仪器的总数极其有限且基本上是用来装备也是根据维尔特的倡议而设立的磁观测站。

20 世纪初, 电工学的迅速发展要求制造新的磁测量工具、需要测量电机和电测量仪器隙缝内的磁感应强度、测量磁通量和估计材料的磁特性。

在苏联磁测量技术的发展过程中, 1930 年初对库尔斯克地磁异常现象的研究以及到 1941 年前后才告结束的在全国领土上进行的综合磁测量起到了巨大的推动作用。在此期间, 拟定(在世界上属首次)并运用了最有效的方法, 即航空磁测量法, 同时涌现出一些根据新的测量原理制成的仪器。

近 10 年来, 磁测量技术获得了最大规模的发展。促进这种发展的原因有两个: 其一是出现了一些新的需要(对石油和天然气采用磁力勘探、宇宙研究等); 其二是由于现代物理学的成就而提供了一些新的可能性。这里所指的是出现一些根据原子内部现象及超导现象来测量磁参数的新原理。

目前, 苏联已成批生产在极宽磁感应强度范围( $10^{-12}$ —10 特斯拉)内应用的各种各样的磁测量器具。一些按不同工作原理建立的器具正在由有关专业部的所属单位研制和生产。在个别情况下, 磁测量器具也向外国公司购买。因此, 确保用这些器具进行统一和可靠的测量已成为一个极其现实的问题。

这个问题的解决与建立磁学单位基准及建立用以校准和检定工作仪器的标准测量器具是相联系的。如果说在 30—40 年前磁感应强度(磁场强度)的基准可以具有 0.1% 的误差, 那么在今天甚至 0.001% 的误差也不能满足实际要求。显然, 进一步改善工作仪器与改善测量的基准和标准器具密切相关, 否则是不可思议的。本书将对所有这些问题进行综合研究。

## B-2 电磁场方程

研究电磁过程(其中也包括测量变换, 通过测量变换便能得到磁场参数的数据信息)的理论基础是麦克斯韦方程, 当应用于固定媒质时, 以合理化形式写出的麦克斯韦方程具有下列形式:

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \quad (\text{B-1a})$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (\text{B-1b})$$

$$\text{div}\mathbf{D} = \rho; \quad (\text{B-1c})$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0. \quad (\text{B-1d})$$

式中,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  分别是电场强度和磁场强度;  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{B}$  是电感应强度矢量和磁感应强度矢量;  $\mathbf{j}$  是电流密度矢量;  $\rho$  是体电荷密度。

由于矢量  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{H}$  与矢量  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{E}$  都是独立引入的, 故可以对方程 (B-1) 附加下列关系:

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\varphi}([\mathbf{H}]); \mathbf{D} = \boldsymbol{\chi}([\mathbf{E}]), \mathbf{j} = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{E}), \quad (\text{B-2})$$

式中,  $\boldsymbol{\varphi}$ ,  $\boldsymbol{\chi}$  和  $\boldsymbol{\phi}$  分别表示媒质的各向异性和非线性特性的矢量函数; 方括弧表明有可能存在滞后现象。

为了简化计算, 常常引入辅助矢量函数  $\mathbf{A}$ .  $\mathbf{A}$  称为矢量位并由条件  $\text{rot}\mathbf{A} = \mathbf{H}$  决定. 从大量函数中选择能满足等式  $\text{div}\mathbf{A} = 0$  的函数, 这时, 对于各向同性媒质得到下列表示式:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{j}}{r} dv. \quad (\text{B-3})$$

式中,  $r$  是从体元  $dv$  到对矢量  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{H}$  进行计算的点的距离。

对于  $\text{rot}\mathbf{H} = 0$  的情况, 矢量  $\mathbf{H}$  由下列标量位确定:

$$\mathbf{H} = -\text{grad}U_m \quad (\text{B-4})$$

矢量磁位  $\mathbf{A}$  和标量磁位  $U_m$  是两个便于计算的量。

对于运动媒质的综合是根据洛伦茨变换来实现的<sup>[65]</sup>. 利用洛伦茨变换, 可以得到在不同计算系统中测得的磁学量和电学量之间的关系式. 我们只利用下面两个对缓慢运动 ( $v \ll c$ , 这里,  $c$  是光速) 具有最简单形式的表示式:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (\text{B-5a})$$

$$\mathbf{H}' = \mathbf{H} - \mathbf{v} \times \mathbf{D} \quad (\text{B-5b})$$

首先利用 (B-5a) 式. 由于电荷  $q$  是不变的量, 即它与所选择的计算系统无关, 故对 (B-5a) 式的左、右两端乘以  $q$  时便得:

$$\mathbf{f}'_z = \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_{ex} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (\text{B-6})$$

式中,  $\mathbf{f}'_z$  是洛伦茨力;  $\mathbf{f}_e$  和  $\mathbf{f}_{ex}$  是在“固定”计算系统中观察到的洛伦茨力的分量, 分别称为电力和电动力学力(磁力)。这里, (B-6) 式是根据相对论的假设, 从理论上导出的<sup>[65]</sup>。

由 (B-6) 式可见, 运动电荷仿佛是磁场的“指示器”或“试体”, 这与用固定电荷作为电场的“指示器”或“试体”的情况完全相同。

确立磁场与宏观(自由)电流或与微观(束缚)电流相互作用的方程(而不是确立磁场与单个运动电荷相互作用的方程)有着巨大的实际意义。

从单个运动电荷过渡到电流并在 (B-6) 式中设  $\mathbf{E} = 0$  时, 便得

$$d\mathbf{F}_{ex} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (\text{B-7})$$

这就是安培定律。这里, 电动力学力  $d\mathbf{F}_{ex}$  是以加在电流元  $I d\mathbf{l}$  上的机械力的形式出现。

对 (B-7) 式的左、右两端积分并从机械力  $\mathbf{F}_{ex}$  过渡到力矩  $\mathbf{P}$ , 便得到安培定律的另一种书写形式:

$$\mathbf{P} = \mathbf{M} \times \mathbf{B} \quad (\text{B-8})$$

式中,  $\mathbf{M} = I \mathbf{s} = \mathbf{J} \nu$  是载有宏观或微观电流的回路或物体;  $\mathbf{s}$  是回路面积的矢量符号;  $\mathbf{J}$  和  $\nu$  是物体的磁化强度及其体积。

磁场与电流之间有互作用力——这并非是磁场的唯一表现形式。磁场的另一种表现形式是电磁感应。

将 (B-5a) 式的左、右两端沿闭合回路积分, 并利用不随计算系统而变的 (B-16) 式, 便得<sup>1)</sup>

$$\oint_L \mathbf{E}' d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} d\mathbf{s} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{s} + \oint_L \mathbf{v} \times \mathbf{B} d\mathbf{l} \quad (\text{B-9})$$

这就是对运动媒质导出的电磁感应定律(法拉第-麦克斯韦定律)。

方程 (B-9) 也常常写成下列形式:

1) 这里还利用了斯托克斯定理和等式  $\partial \mathbf{B}' / \partial t = d\mathbf{B} / dt$ , 其中,  $d\mathbf{B} / dt$  称为实导数 (Материальная производная)。

$$e_{\Sigma} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{B-10})$$

式中,  $e_{\Sigma} = \oint_L \mathbf{E}' d\mathbf{l}$  是在回路  $L$  内的感应电动势;  $\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{s}$  是穿过回路的磁通量。

安培定律和电磁感应定律将矢量  $\mathbf{B}$  同力学量和电学量联系起来。

当磁场是以作用在电流上的力或引起电流(由于电磁感应的结果)的形式出现时,电流也会产生磁场。这是由毕奥-沙伐-拉普拉斯定律和全电流定律推出的。

根据毕奥-沙伐-拉普拉斯定律,由电流  $I$  产生的磁场强度矢量由下式确定:

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \oint_L \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2} \quad (\text{B-11})$$

式中,  $I d\mathbf{l}$  是电流元;  $r$  是到被考察点的距离;  $\mathbf{r}^0$  是单位矢量。这个定律的现代解释是;它是库仑定律应用于运动电荷的结果<sup>[65]</sup>。

通过对 (B-56) 式的左、右两端积分并利用 (B-1a) 式,便能得到运动媒质的全电流定律:

$$\oint_L \mathbf{H}' d\mathbf{l} = \int_S \left( \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \text{rot} \mathbf{v} \times \mathbf{D} \right) d\mathbf{s} = \Sigma I \quad (\text{B-12})$$

由上式得出,矢量  $\mathbf{H}$  的闭合积分等于下面两部分电流之和:

(1)回路内的传导电流、运动电流和位移电流;(2)积分回路在矢量  $\mathbf{D}$  的电场中移动所引起的电流。

毕奥-沙伐-拉普拉斯定律和全电流定律将矢量  $\mathbf{B}$  同宏观电流与长度参数联系起来。

上述几个定律便作为磁测量变换的基础。

### B-3 磁学量、被测参数和测量单位

从现代的观点来看,<sup>[7,63,71,72,98]</sup>测量就是将给定的物理量与取作它的单位的某个数值进行比较的过程。测量过程被分成为一系

列称之为测量变换的相互独立的步骤。根据被测的量是自变量或是自变量的函数,还可以分为直接变换和反变换<sup>[72]</sup>。

若变换的结果能得到被测物理量的数值大小,则这样的变换称为直接变换。可以把安培定律或电磁感应定律作为直接变换的基础,其中,矢量 **B** 作为自变量,而加到物体上的力矩 **P** 或回路内感应的电动势则是自变量的函数[见(B-8)式和(B-9)式]。

若变换的结果能复现未知量,则这样的变换便称为反变换。因此,可以把毕奥-沙伐-拉普拉斯定律和全电流定律作为反变换的基础,其中,电流 *I* 以及长度参数 *l* 和 *r* 是自变量,而矢量 **H** 和回路积分  $\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l}$  则是自变量的函数[见(B-11)式和(B-12)式]。

根据上述概念,在反变换过程中所复现的量应当与被测的量有着相同的量纲。但是,在国际单位制中,磁场强度与磁感应强度\*的量纲不同。因此,在进行反变换时,除了前述规律之外,还应利用矢量 **B** 和 **H** 之间的关系式(B-2)。在真空中,**B** 和 **H** 有下列简单关系

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H} \quad (\text{B-13})$$

式中,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  亨/米,是国际单位制中的磁常数,是根据力学单位与电学单位相对应的关系而得到的。

在测量过程中,直接变换和反变换总是相互联系的。进行直接变换时,必然要利用反变换的结果。这在校准一次变换器或仪器的特性时是应当牢记的,而对于比较仪器则应直接利用反变换的结果。进行反变换时,如用标准电感线圈复现磁感应强度的单位,若不以某种方式利用直接变换的结果,便不可能将这个单位的量值传递给其他的标准量具和工作量具。

上述相互关系反映了测量的实质是将给定的物理量与取作单位的同名量进行比较的过程。

在转入定义最广泛使用的磁学量、被测参数和测量单位之前,

---

\* 原文是 Магнитная индукция 直译为“磁感应”,但一般习惯称这个量为磁感应强度,它和磁通密度是同一个量。——译注

我们将对本书书名中提到且在全书中使用的“磁场参数”的概念本身进行讨论。

广义而言,磁场参数被理解为表征磁场结构的标量、矢量和张量,它们都不随坐标系统而变化。属于这类不变量的有磁通量、磁感应强度矢量、磁场非均匀性张量以及前面提到的一些计算量。从这个意义上说,“参数”被用作“物理量”的同义语。

狭义而言(我们认为,这种理解最适用于计量学),应当把与上述矢量和张量具有函数关系的标量理解为磁场参数或被测参数。这就是矢量  $\mathbf{B}$  的模值  $|\mathbf{B}|$  或其分量  $B_i (i = x, y, z)$ 、表征磁场非均匀性的导数  $\partial B_i / \partial l_i$  或  $\partial |\mathbf{B}| / \partial l_i$ 、标量的幅度和平均值(对标量是时间的函数的情况)等。实际上,这些量都能直接测量出来,也就是说,我们能根据它们来判断上述矢量和张量。除了这些能被直接测量的参数之外,还要谈到一些计算参数。属于这类参数的有矢量  $\mathbf{H}$  的模值和分量、磁矩  $\mathbf{M}$  的模值和分量等。 $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{M}$  都是表示场源强度的量。

表 B-1 列出了最常使用的磁学量、被测参数和测量单位。下面,我们对这个列表作一些说明。

如前所述,常数  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  亨/米是根据力学单位与电学单位和其他单位相对应而得到或加以选择的,这种对应关系则是建立在真空中两个载流导体的相互作用力的基础上(安培定律)。

在国际单位制中是计算量(实验中常常采用)的磁场强度可以由毕奥-沙伐-拉普拉斯定律的表示式确定。从这个表示式可以看出,磁场强度的单位是安/米。

磁感应强度可以根据磁场中作用在载流导体上的力来确定(安培定律),或是根据放置在磁场中的回路内感应的电动势来确定(电磁感应定律),也就是说,磁场强度是通过直接磁测量变换的结果来确定的。但是,如果只限于真空(空气)条件,则利用反变换方程可以将常数  $\mu_0$  和矢量  $\mathbf{H}$  作为确定磁感应强度矢量的基础

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H} = \mathbf{K}_B I \quad (\text{B-14})$$

式中,  $\mathbf{K}_B$  是标准线圈的常数,知道了常数  $\mathbf{K}_B$  (它是由线圈的几何

表 B-1 基本磁学量、被测参数和以国际单位制表示的测量单位

| 磁 学 量           |                |                                                                                                                                                                                 | 测 量 单 位                                           |                              |                                                            |
|-----------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 名 称<br>(数学特征)   | 表示符号           | 定 义 方 程                                                                                                                                                                         | 被 测 参 数<br>(标量)                                   | 名称及表<br>示符号                  | 量 纲<br><br>从非合理化绝对单<br>位制过渡到国际单<br>位制时的转移系数                |
| 磁 常 数<br>(标量)   | $\mu_0$        | 根据下列适用于真空的方程，由电学<br>单位与力学单位的对应关系作出选<br>择(安培定律)<br>$d\mathbf{F}_{\odot A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 d\mathbf{l}_1 \times d\mathbf{l}_2 \times \mathbf{r}^0}{r^2}$ | —                                                 | 亨/米<br>( $\Gamma/\text{M}$ ) | $\text{LMT}^{-2}\text{I}^{-2}$<br><br>$4\pi \cdot 10^{-7}$ |
| 磁场强度(矢量)        | $\mathbf{H}$   | $\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \oint_L \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2}$<br>(毕奥—沙伐—拉普拉斯定律)                                                                             | $H_i (i = x, y, z);$<br>$H =  \mathbf{H} $        | 安/米<br>( $\text{A/M}$ )      | $\text{L}^{-1}\text{I}$<br><br>$10^3 \frac{1}{4\pi}$       |
| 真空中的磁感应强度(矢量)   | $\mathbf{B}_0$ | $\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H} = \mathbf{K}_B I$                                                                                                                              | $B_{0i} (i = x, y, z);$<br>$B_0 =  \mathbf{B}_0 $ | 特斯拉                          | $\text{MT}^{-2}\text{I}^{-1}$<br><br>$10^{-4}$             |
| 磁化媒质中的磁感应强度(矢量) | $\mathbf{B}$   | $\mathbf{B} = \phi^*([\mathbf{B}_0]);$<br>$\mathbf{B} = \mathbf{i}_0 \frac{d\Phi}{ds}$                                                                                          | $B_i (i = x, y, z)$<br>$B =  \mathbf{B} $         | ( $\text{T}$ )               |                                                            |
| 相对导磁率(张量)       | $\hat{\mu}$    | $\hat{\mu} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{B}_0}$                                                                                                                                   | $\mu_{ik}$<br>$(i = x, y, z;$<br>$k = x, y, z)$   | 无                            | 无量纲的量<br><br>1                                             |