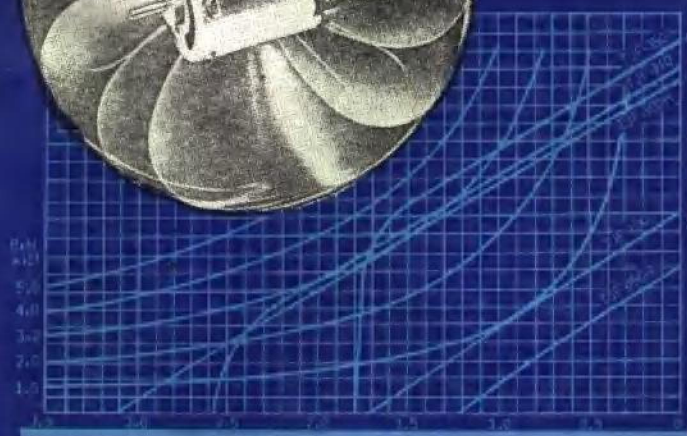
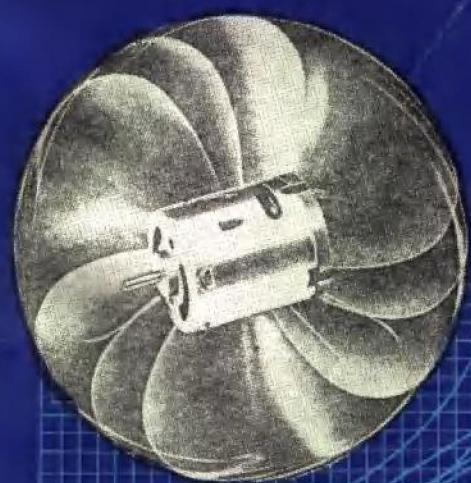


# 小型精密电动机的 基础和应用

〔日〕山田 博 著



机械工业出版社

本书系统地阐述了各类微电机及其控制。前四章概要叙述电动机的基本理论、特性、材料和设计要点；第五章到第八章分别讨论各类微电机的具体结构、性能及应用；第九章到第十二章讨论微电机典型控制系统的原理、组成和特性；第十三章为若干微电机参数的测定方法。书中除包括各类典型的微电机外，还包括了许多特殊的形式。另外，还介绍了一些最新的应用技术。

本书可供从事自动控制系统设计和研究的科技人员阅读，也可作为高等学校自动化专业高年级学生的教学参考书；对于微电机本专业的技术人员，本书可在微电机的控制和应用等方面，提供许多基本知识，供研究、设计和生产时参考。

## 精密小形モータの基礎と応用

山田 博 著

総合電子出版社

1981年7月10日第5版

\* \* \*

## 小型精密电动机的基础和应用

〔日〕 山田 博 著

胡仁芳 译

唐任远 校

\*

责任编辑：李振标

封面设计：方 芬

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/32·印张 11<sup>3</sup>/<sub>8</sub>·字数 247千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 0,001—3,850·定价：5.10元

\*

ISBN 7-111-00167-2/TM·34



## 译 者 的 话

随着工厂、办公室和家庭自动化技术的普及，微特电机的应用日益广泛，发展十分迅速，正在以惊人的速度进入千家万户，对人们的工作、学习和生活发挥着越来越大的作用。

我国已经出版的各种微特电机书籍，大多偏重于微特电机的理论、设计和制造，主要适用于本专业工程技术人员。对于使用部门的大量读者，如何选用合适的微特电机，进行合理的系统设计，则至今缺乏比较系统和实用的参考书。

《小型精密电动机的基础和应用》一书，可以弥补这方面的不足。本书讨论微特电机中应用最为广泛的微型电动机，从基本概念出发，系统而全面地介绍了各种微型电动机的原理、结构和特性，重点讨论了他们的应用和常用的典型控制技术。特别是在用电动机实现位置控制和转速控制时的基本观点及其设计要点，本书作了详细的论述，论点清晰，叙述简明，举例翔实，内容丰富，对于使用微特电机的工程技术人员，是一本很有用的实用参考书。

该书在日本，从1975年6月出版第一版后，颇受读者欢迎，到1981年7月，已再版到第五版。我们是按其第五版进行翻译的，相信我国微特电机及其使用部门的广大技术人员，可以从中得到裨益。

本书在翻译过程中，得到许多同志的帮助，特别是沈阳工业大学唐任远教授，对全部译稿作了仔细的审校，在此，一并致谢。

IV

由于译者的水平有限,书中的错误和不当之处在所难免,  
请广大读者指正。

译者

1984年3月

## 原 序

近年来,由于日用电器、电子学及自动控制的发展,小型精密电动机作为将电能转换为机械能的最重要的一类元件,需要量相当惊人。在这种状况下,作者能有机会编写本书,感到非常荣幸。

小型精密电动机分为永磁微电机、无铁心电动机等直流电动机;异步电动机、磁阻电动机、磁滞电动机等交流电动机以及步进电动机等。如果再加上各种特殊电动机,则它们的种类就更多了。然而,在各种各样的电动机中,都有产生转矩的共性部分,其形式是不多的。而且,在研究了电动机的转矩产生原理后,可以发现,除了静电电动机外,几乎所有的电动机都是利用磁力工作的。

本书试图以尽可能多的电动机为对象,并着眼于它们的共同点,将利用磁力实现机电能量转换的各种电动机紧密地联系起来。也就是说,目的在于充分理解电动机最重要的基础知识。这就是本书书名中加入“基础”一词的主要原因。掌握这些基础,不只局限于本书的应用,更在于希望读者能由此建立新的概念,并用以开发实现机电能量转换的新型电动机。

另一方面,这些小型精密电动机已与其控制装置等电子设备越来越不可分离,因此,本书对于电动机电子学也给予相当的重视。

本书力图能适应范围较广的读者,既包括电动机的使用者和制造者,也适用于普通工科大学的毕业生。但这决不是

## Ⅵ

说，读者从本书只能得到一些粗浅的知识。

如上所述，本书引入了作者的一些独特见解，但由于作者才疏学浅，可能有某些考虑不当之处，敬请读者给予指正。

最后，对于综合电子出版社的鹰野隆彦先生、石崎隆澄先生的热忱支持，表示衷心的感谢。

山田 博  
1975年6月

# 目 录

## 原序

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第一章 电动机的电磁理论</b> ..... | 1  |
| 1-1 电动机的分类和定义 .....       | 1  |
| 1-2 磁场强度和磁通密度 .....       | 2  |
| 1-3 磁滞回线 .....            | 6  |
| 1-4 脉振磁场和旋转磁场 .....       | 7  |
| 1-5 感应电势 .....            | 11 |
| 1-6 电动机转矩 .....           | 16 |
| <b>第二章 电动机的基本特性</b> ..... | 24 |
| 2-1 永磁微电机的基本特性 .....      | 24 |
| 2-2 无铁心电动机的基本特性 .....     | 28 |
| 2-3 无刷电动机的基本特性 .....      | 30 |
| 2-4 直流并励电动机的基本特性 .....    | 31 |
| 2-5 交直流两用电动机的基本特性 .....   | 34 |
| 2-6 感应电动机的基本特性 .....      | 36 |
| 2-7 永磁同步电动机的基本特性 .....    | 41 |
| 2-8 反应式电动机的基本特性 .....     | 44 |
| 2-9 磁滞电动机的基本特性 .....      | 47 |
| 2-10 单极电动机的基本特性 .....     | 51 |
| <b>第三章 组成电动机的材料</b> ..... | 53 |
| 3-1 铁心材料 .....            | 53 |
| 3-2 永磁材料 .....            | 60 |
| 3-3 导电材料 .....            | 66 |
| 3-4 绕组材料 (电磁线) .....      | 69 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 3-5        | 绝缘材料 .....              | 72         |
| 3-6        | 接点和接触部件 .....           | 78         |
| 3-7        | 轴承 .....                | 84         |
| <b>第四章</b> | <b>电动机的基本设计 .....</b>   | <b>102</b> |
| 4-1        | 电枢铁心 .....              | 102        |
| 4-2        | 罩极线圈建立的移动磁场 .....       | 103        |
| 4-3        | 单相运行 .....              | 105        |
| 4-4        | 牵入同步 .....              | 108        |
| 4-5        | 定子齿槽的影响及相应措施 .....      | 110        |
| 4-6        | 电动机的小型化和效率 .....        | 116        |
| 4-7        | 电动机的转速脉动及相应措施 .....     | 117        |
| <b>第五章</b> | <b>非同步电动机 .....</b>     | <b>125</b> |
| 5-1        | 永磁微电机 .....             | 125        |
| 5-2        | 无铁心电动机 .....            | 127        |
| 5-3        | 无刷电动机 .....             | 132        |
| 5-4        | 交直流两用电动机 .....          | 138        |
| 5-5        | 感应电动机 .....             | 142        |
| <b>第六章</b> | <b>同步电动机 .....</b>      | <b>153</b> |
| 6-1        | 永磁同步电动机 .....           | 153        |
| 6-2        | 反应式电动机 .....            | 160        |
| 6-3        | 磁滞电动机 .....             | 163        |
| 6-4        | 感应子电动机 .....            | 177        |
| <b>第七章</b> | <b>步进电动机和自整角机 .....</b> | <b>179</b> |
| 7-1        | 步进电动机 .....             | 179        |
| 7-2        | 自整角机 .....              | 186        |
| <b>第八章</b> | <b>特殊电动机 .....</b>      | <b>202</b> |
| 8-1        | 带辅助极的永磁直流电动机 .....      | 202        |



|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 8-2        | 反应式无刷电动机           | 202        |
| 8-3        | 自励式同步电动机           | 203        |
| 8-4        | 半速电动机              | 204        |
| 8-5        | 直线电动机              | 205        |
| 8-6        | 无槽电动机              | 207        |
| 8-7        | 力矩电动机              | 211        |
| 8-8        | 频率调制电动机            | 217        |
| 8-9        | 滚动电动机              | 218        |
| 8-10       | 谐波电动机              | 222        |
| 8-11       | 音叉电动机              | 223        |
| 8-12       | 静电电动机              | 224        |
| <b>第九章</b> | <b>伺服电动机用于位置控制</b> | <b>227</b> |
| 9-1        | 自动化和伺服电动机          | 227        |
| 9-2        | 位置控制系统的组成          | 227        |
| 9-3        | 组成元件和特性            | 230        |
| 9-4        | 用永磁微电机的控制          | 237        |
| 9-5        | 用无铁心电动机的控制         | 239        |
| 9-6        | 用无刷电动机的控制          | 240        |
| 9-7        | 用直流并励电动机的控制        | 241        |
| 9-8        | 用感应电动机的控制          | 245        |
| 9-9        | 用步进电动机的控制          | 247        |
| 9-10       | 用力矩电动机和力电机的控制      | 257        |
| <b>第十章</b> | <b>电动机的转速控制</b>    | <b>260</b> |
| 10-1       | 电动机的定速控制和变速控制      | 260        |
| 10-2       | 转速控制系统的组成          | 261        |
| 10-3       | 组成元件和特性            | 262        |
| 10-4       | 永磁微电机的转速控制         | 266        |

|               |                                |            |
|---------------|--------------------------------|------------|
| 10-5          | 无铁心电动机的转速控制 .....              | 278        |
| 10-6          | 无刷电动机的转速控制 .....               | 280        |
| 10-7          | 交直流两用电动机的转速控制 .....            | 282        |
| 10-8          | 感应电动机的转速控制 .....               | 284        |
| 10-9          | 同步电动机的变速控制 .....               | 288        |
| <b>第十一章</b>   | <b>电动机的同步控制 .....</b>          | <b>294</b> |
| 11-1          | 电动机的转速脉动和位移及其同步控制 .....        | 294        |
| 11-2          | 同步控制系统的组成 .....                | 295        |
| 11-3          | 回环的元件和特性 .....                 | 296        |
| 11-4          | 非同步电动机的同步控制 .....              | 302        |
| 11-5          | 在同步电动机中的应用 .....               | 318        |
| 11-6          | 超低速、高精度同步控制 .....              | 320        |
| <b>第十二章</b>   | <b>用电动机直接驱动负载 .....</b>        | <b>322</b> |
| 12-1          | 直接驱动的目的 .....                  | 322        |
| 12-2          | 直接驱动的原理 .....                  | 322        |
| 12-3          | 直接驱动用电动机的种类和形式 .....           | 323        |
| 12-4          | 直接驱动用电动机的结构和特性 .....           | 324        |
| 12-5          | 直接驱动用电动机的转速稳定性 .....           | 327        |
| 12-6          | 直接驱动用电动机的噪声、晃动及其相<br>应措施 ..... | 331        |
| 12-7          | 直接驱动用电动机的应用 .....              | 332        |
| <b>第十三章</b>   | <b>电动机的测试 .....</b>            | <b>333</b> |
| 13-1          | 转矩的测定 .....                    | 333        |
| 13-2          | 转矩脉动和转速脉动的测定 .....             | 340        |
| 13-3          | 不平衡度的测定 .....                  | 346        |
| 13-4          | 温度和绝缘的测定 .....                 | 349        |
| <b>主要参考文献</b> | <b>.....</b>                   | <b>352</b> |

# 第一章 电动机的电磁理论

## 1-1 电动机的分类和定义

对于小型精密电动机的分类和定义，至今仍有某些不够明确的地方。这里，仅对本书涉及的大部分小型电动机进行分类及定义如下。

(1) 永磁微电机 $\ominus$ ：定子上使用永磁体的超小型精密直流电动机。

(2) 无铁心电动机：定子上使用永磁体，转子上没有铁心的小型精密直流电动机。

(3) 无刷电动机：转子上有永磁体，没有电刷的小型精密直流电动机。

(4) 直流并励电动机：定子上使用并励绕组，转子为电枢的小型精密直流电动机。

(5) 交直流两用电动机：定、转子上都有绕组，交、直流两用的小型精密串励换向器电动机。

(6) 感应电动机：利用由转子内的感应电流所产生的异步转矩工作的小型精密交流电动机。

(7) 反应式电动机：利用转子在磁性上呈凸极而产生磁阻转矩工作的小型精密交流同步电动机。

(8) 永磁同步电动机：转子上使用永磁体，利用电磁转矩工作的小型精密交流同步电动机。

---

$\ominus$  原文“マイクロモータ”，直译为微型电动机，与我国微型电动机或简称微电机的含义不同，因此，本书统一译作永磁微电机——译者注。

换句话说，平行于接触面的磁场强度和垂直于接触面的磁密，在该面上是连续的。反之，平行于接触面的磁密和垂直于接触面的磁场强度，在该面上是突变的。

对于图1-1:

$$\left. \begin{array}{ll} H_1 = H_2 & B_1 \neq B_2 \\ B'_1 = B'_2 & H'_1 \neq H'_2 \end{array} \right\} \quad (1-3)$$

例如，参照图1-2，在电动机中，磁通在通过磁导率为  $\mu_0$  的气隙，进入磁导率为  $\mu'$  的磁性物质时，有

$$\left. \begin{array}{ll} H_{\parallel} = H'_{\parallel} & \frac{B_{\parallel}}{\mu_0} = \frac{B'_{\parallel}}{\mu'} \\ B_{\perp} = B'_{\perp} & \mu_0 H_{\perp} = \mu' H'_{\perp} \end{array} \right\} \quad (1-4)$$

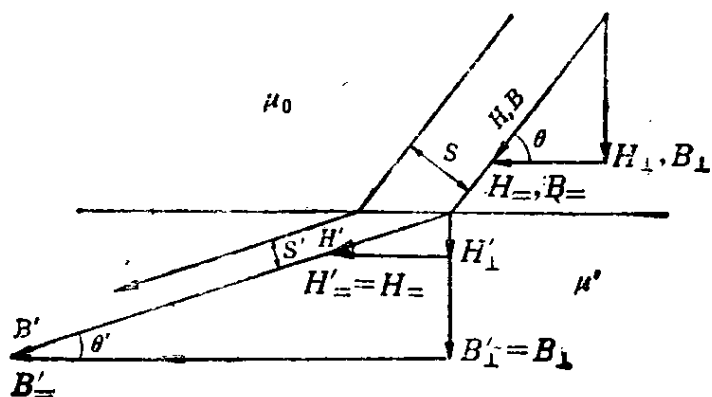


图1-2 磁通的折射

图中， $\theta$  与  $\theta'$  的关系按下式确定：

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{H_{\perp}}{H_{\parallel}} = \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}}$$

于是

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{H'_{\perp}}{H'_{\parallel}} = \frac{B'_{\perp}}{B'_{\parallel}} = \frac{\mu_0 B_{\perp}}{\mu' B_{\parallel}} = \frac{\mu_0}{\mu'} \operatorname{tg} \theta$$

$\mu_i$ —— $\mu$ 的虚数部分。

$\mu_r$  的含义是产生与磁场强度  $H$  成正比的磁密、在空间储存磁能的电感分量。而  $\mu_i$  的存在则表示磁畴壁移动或磁畴改变方向时，存在着类似于摩擦的作用，所以，它的含义是产生相对于磁场强度滞后  $\pi/2$  的磁密、对应于转换为热能的等效电阻分量。

式 (1-1) 表示，物质内某点的磁场强度确定后，该点的磁密也就对应确定，而对该点以外的状态没有任何影响。这表示该点以外的状态发生变化时，只是其磁场强度值本身变化，而不直接改变磁密值。

### 1-2-2 边界条件

如图1-1所示，两个不同的物质1和2相互接触时，接触面上的磁场强度和磁密有如下关系：

- (1) 与接触面方向平行的磁场强度相互相等；
- (2) 与接触面方向垂直的磁密相互相等。

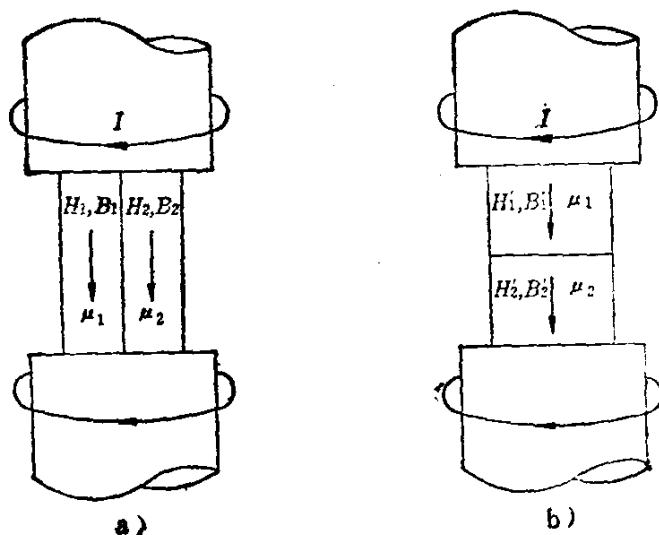


图1-1 边界处的磁场强度和磁密

式中  $H_e$ ——转换为均匀物质后的等效磁场强度；

$U$ ——加于气隙和磁性物质上的总磁势。

式 (1-6) 表示，等效磁导率  $\mu_e$  比没有气隙时要小，且磁性物质与气隙的磁导率比值  $\mu'/\mu_0$  越大，减小程度越明显。

### 1-3 磁滞回线

#### 1-3-1 主回线

取纵坐标为磁密  $B$  (单位面积的磁通)，横坐标为磁场强度  $H$  (单位长度的磁势)，用某种方法使加在磁性材料上的磁场强度随时间缓慢地交替变化，作出各点磁密与磁场强度的关系曲线，此曲线称为磁滞回线，如图 1-4 所示。

磁滞回线的大小随外加磁场强度最大值的增加而增大，增大的方式呈饱和特性。而且，如果忽略磁性物质内的涡流，则磁滞回线具有几乎不随磁场强度的交变速度变化的特点。至少，在交变频率接近工频时是几乎不变的。

如果考虑磁畴旋转时存在着粘性摩擦，则磁滞回线将随频率发生一定的变化。此时，由于非线性摩擦的原因，即由于可以不计重量的磁畴内有着库仑摩擦和回复力，可以看成是在磁滞回线上叠加有饱和的特性。

#### 1-3-2 局部回线

在形成磁滞回线的过程中，使磁场强度局部变化所形成的回线称为局部回线，又称小回线，其特征如图 1-5 所示。

(1) 以 A 点为回复点的回复曲线  $a$  只有一条；

(2) 在曲线  $a$  上的任一点  $B$  处回复时，可得到回复曲线  $b$ ，它必然经过 A 点；

(3) 在曲线  $b$  上  $c$  点处回复的曲线，必然经过 B 点，

可得

$$\theta' = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\mu_0}{\mu'} \operatorname{tg} \theta \right) \quad (1-5)$$

因为  $\mu_0 < \mu'$ ，故由式 (1-5) 可知  $\theta' < \theta$ 。表示磁性物质的  $\mu'$  越大，在它内部的磁通就越倾斜，磁通的截面积  $S'$  变小，也就是起着增大磁密的作用。

### 1-2-3 不均匀物质转换为均匀物质

如图 1-3 a 所示，在气隙和磁性物质共存时，从磁势源角度看来，可以将它转换为如图 1-3 b 所示的等效磁导率为  $\mu_e$  的均匀磁性物质。转换后

$$\begin{aligned} \mu_e &= \frac{B}{H_e} = \frac{B}{\frac{U}{l' + l_0}} = \frac{B(l' + l_0)}{\frac{B}{\mu'} l' + \frac{B}{\mu_0} l_0} \\ &= \mu' \frac{l' + l_0}{l' + \frac{\mu'}{\mu_0} l_0} \end{aligned} \quad (1-6)$$

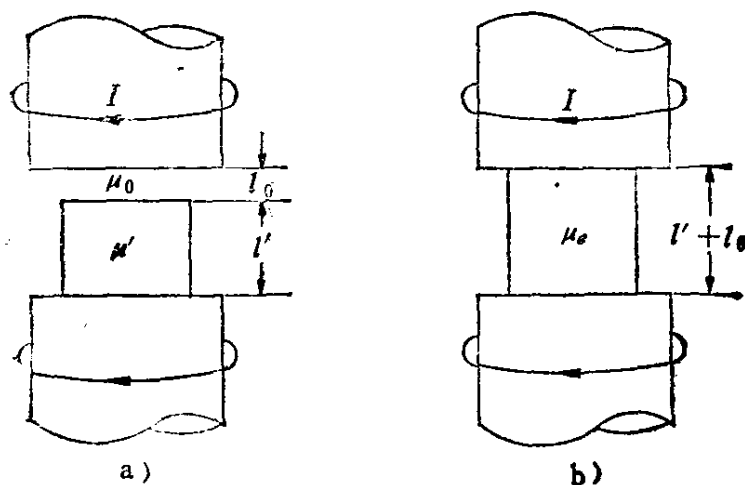


图1-3 媒质的等效转换

分布。但为便于制造，又需开槽，将绕组集中地嵌入槽内，从而使磁场分布呈阶梯状。而且对应槽部的磁场降得越低，它与正弦波的差异就越大。为了使它的分布尽量接近正弦波，一般可采用闭口槽结构或增加槽数。这在磁滞电动机中应特别予以注意。

在诸如磁滞电动机等非线性较严重的电动机中，使磁场是正弦变化是相当重要的问题。

#### 1-4-1 脉振磁场

为简化分析，现讨论理想情况下的脉振磁场，即

$$H = H_m \sin \theta \sin \omega t \quad (1-7)$$

式中  $H$ ——气隙内由定子建立的径向磁场强度，

$\theta$ ——以定子为基准的圆周角，

$\omega$ ——电源角频率。

在式 (1-7) 中，如令  $\theta$  为一定值  $\theta_1$ ，则磁场强度  $H$  以最大值  $H_m \sin \theta_1$  在时间上交变。而如令  $t$  为一定值  $t_1$ ，则  $H$  以最大值  $H_m \sin \omega t_1$  在空间作正弦分布，如图 1-6 所示。

#### 1-4-2 旋转磁场

仍用式 (1-7) 的符号，旋转磁场可用下式表示：

$$H = H_m \cos(\omega t - \theta) \quad (1-8)$$

在式 (1-8) 中，如令  $\theta$  为一定值  $\theta_1$ ，则磁场强度  $H$  随时间作交替变化，其最大值与  $\theta_1$  无关，为  $H_m$ ，相位角为  $-\theta_1$ 。如令  $t$  为一定值  $t_1$ ，则  $H$  在空间呈余弦分布，亦即通常所说的正弦分布，其最大值也是  $H_m$ ，相位角为  $-\omega t_1$ 。如图 1-7 所示。

#### 1-4-3 脉振磁场和旋转磁场的关系

式 (1-7) 可改写为

$$H = H_m \sin \theta \sin \omega t$$



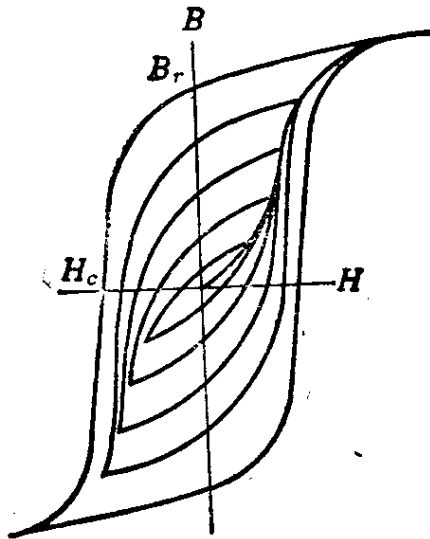


图1-4 磁滞回线（主回线）

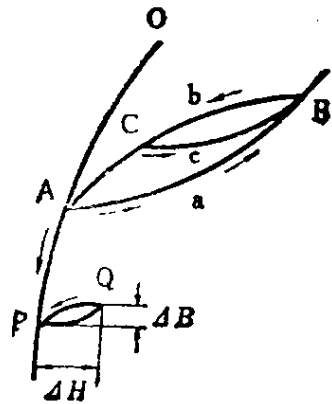


图1-5 局部回线

且其延长线与曲线 a 完全吻合。

因此，当以主回线上的一点 P 作为回复点，而磁场强度在  $\Delta H$  内变化时，可作出局部回线 PQ。此时， $\Delta B / \Delta H$  称为增量磁导率。它是在恒定的磁场强度上，叠加一个小振幅的交变磁场强度后的磁导率有效值，其值随  $\Delta H$  的大小和回复点的位置而异。 $\Delta H \rightarrow 0$  时的磁导率称为可逆磁导率。

#### 1-4 脉振磁场和旋转磁场

要使异步电动机、永磁同步电动机、磁阻电动机和磁滞电动机等交流电动机旋转，必须用定子绕组建立旋转磁场。此旋转磁场的优劣对电动机的性能影响很大。因此，首先应使定子建立的磁场满足：

- (1) 在空间接近正弦分布；
- (2) 在时间上呈正弦变化。

在电动机中，要使磁势呈正弦形分布，必须使绕组连续