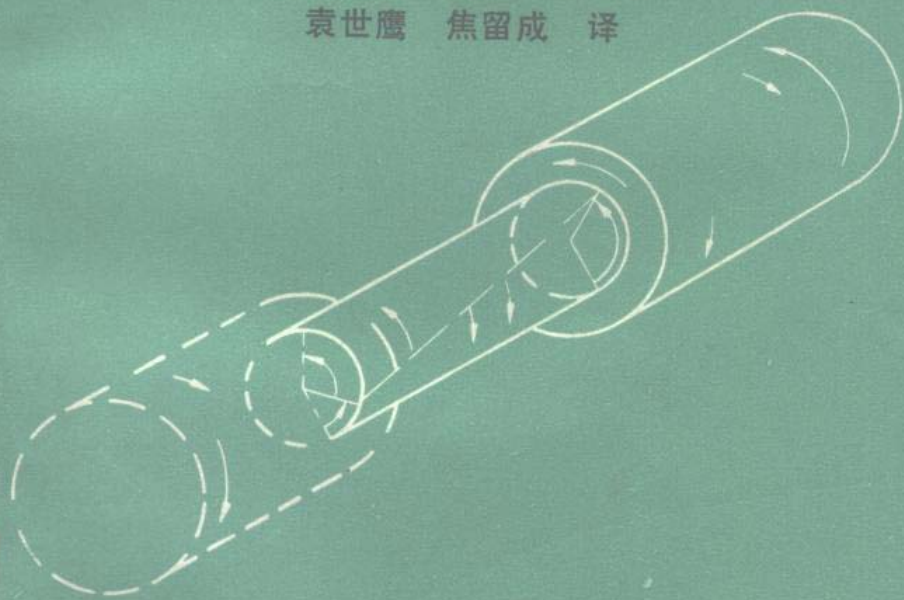


# 电机及拖动 习题解

〔英〕约翰·海德马斯·著

袁世鹰 焦留成 译



煤炭工业出版社

# 电机及拖动习题解

〔英〕约翰·海德马斯 著

袁世鹰 焦留成 译

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

## 内 容 提 要

本书是英国曼彻斯特大学约翰·海德马斯编写的。全书共分八章，书后有三个附录，主要内容包括：前七章讨论了变压器、直流电机、异步电机和同步电机及拖动的稳态和暂态运行问题；第八章讨论了交、直流电机的数学和计算机模拟；在附录中附有大量的习题，并附有答案。

本书适用于所有学习电机及拖动的工科大学生，也有部分较深的内容，例题和习题适用于研究生，也可供具有一定电机理论和拖动知识的工程技术人员和研究人员参考。

John Hindmarsh  
**ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES**  
**WORKED EXAMPLES 2nd Edition**

Robert Maxwell, M.C., 1985

## 电 机 及 拖 动 习 题 解

〔英〕约翰·海德马斯

袁世鹰 焦留成 译

责任编辑：顾建中

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092\text{mm}^{1/32}$  印张 $13\frac{1}{8}$

字数287千字 印数1—2,930

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

**ISBN 7-5020-0640-0/TD·588**

书号 3409 G0246 定价 9.60元

## 译者的话

《电机及拖动习题解》(第二版)一书,是由在曼彻斯特大学任教多年,并具有长期从事电机设计、制造及应用经验的约翰·海德马斯编写的。本书是《电机及其应用》一书的姐妹篇。

本书的内容包括了各种基本类型电机及拖动的问题,在扼要复习《电机及其应用》中相应内容的基础上,通过例题的讨论和求解,对电机及拖动的内容进行教学,可以认为本书是一本通过例题进行教学的教科书。

本书精选了100多个例题,许多例题还包含有若干个小题,在附录中附有大量的习题,并附有答案。这些例题和习题大部分来源于工程实际,部分例题和习题来自曼彻斯特大学的考卷。书的精华就在于这些例题和习题非常好,例题和习题的编排由浅入深。

学习电机及拖动的学生和自学电机及拖动的读者,都希望手中有一本好的《电机及拖动习题解》,以帮助加深对所学知识的理解,进而将理论引导到实践。为此,我们将这本书译出奉献给广大读者。

参加本书翻译的有袁世鹰、焦留成。袁世鹰对全书作了审校。译文中对原文的版误尽量作了更正。由于翻译时间仓促,加之水平所限,错误难免,恳请广大读者提出宝贵意见。

1992年1月

## 符 号 表

下面的符号表包括了全书最常用的符号，不包括只在某些章节使用的和通用的符号，例如表示电阻  $R$  的电路符号和表示三相量的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  等。一些符号表示一个以上的量（表中已指出）。绝大部分符号与英国标准协会 BC1991 推荐的符号一致。

瞬时值用小写字母表示，例如  $e$  表示瞬时电势和  $i$  表示瞬时电流。

有效值和稳定直流值用大写字母表示，例如  $E$ ， $I$ 。

最大值写成： $\hat{E}$ ， $\hat{I}$ 。

用黑体字表示相量、矢量和矩阵，例如  $\mathbf{E}$ ， $\mathbf{I}$ 。一般情况下，用符号  $\mathbf{E}(e)$  表示由互感磁通而感生的电势，用符号  $V(v)$  表示端电压。

|        |                                          |
|--------|------------------------------------------|
| $A_i$  | 安匝。                                      |
| $B$    | 磁通密度，特斯拉 (T) ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ )， |
| $d$    | 表示直轴量的符号。                                |
| $d$    | 电枢直径， $m$ 。                              |
| $e$    | 自然对数的底。                                  |
| $E_f$  | 由励磁磁势 $F_f$ 产生的电势。                       |
| $f$    | 频率，Hz。                                   |
| $F$    | 安匝磁势。每极每相峰值磁势。                           |
| $F'_d$ | 直流电枢绕组每极有效磁化磁势。                          |
| $F_d$  | 电枢绕组每极峰值磁势。                              |

|           |                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------|
| $F_f$     | 励磁绕组每极峰值磁势。<br>(注意下标 $\alpha$ 和 $f$ 也用作电流、磁通、电枢电阻和磁场电阻的符号下标) |
| $F_r$     | 每极峰值合成磁势。                                                    |
| $I_{f,1}$ | 满载电流。                                                        |
| $I_s$     | 激磁支路电流。                                                      |
| $I_m$     | $I_0$ 的无功或磁化分量。                                              |
| $I_p$     | $I_0$ 的有功分量。                                                 |
| $J$       | 转动惯量, $\text{kgm}^2$ 。                                       |
| $k$       | 系数。常数。                                                       |
| $k_f$     | 每励磁安培或每单位磁势产生的伏数。                                            |
| $k_{f,0}$ | $k_f$ 的饱和值。                                                  |
| $k_s$     | 磁通系数 = 每弧/秒或每安培转矩产生的伏数。                                      |
| $l$       | 导体长度。磁路长度。                                                   |
| $l$       | (或 $l_1, l_2$ 等) 漏电感。                                        |
| $L$       | 一般电感符号; 例如 $L_{11}$ = 线圈 1 的自感, $L_{12}, L_{13}$ 等表示互感。      |
| $m$       | 相数。                                                          |
| $M$       | 另一种互感符号。                                                     |
| $n$       | 转速, $\text{r/s}$ 。                                           |
| $n_s$     | 同步转速 = $60f/p$ , $\text{r/s}$ 。                              |
| $N$       | 转速。                                                          |
| $N_s$     | 同步转速 = $60f/p$ , $\text{r/s}$ 。                              |
| $p$       | 算符 $d/dt$ 。                                                  |
| $p$       | 极对数。                                                         |
| $p.u.$    | 表示标么值。                                                       |

|                       |                                                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $P$                   | 功率。                                                                   |
| $P_{\text{control}}$  | 控制端功率。                                                                |
| $P_{\text{elec}}$     | 电端总功率 ( $P_s =$ 每相功率)。                                                |
| $P_{\text{gap}}$      | 气隙总功率 ( $P_g =$ 每相功率)。                                                |
| $P_{\text{tr}}$       | 转换的机械功率 (每相), ( $m \cdot P_m = \omega_m \cdot T_s$ )。                 |
| $P_{\text{mech}}$     | 机端功率, ( $\omega_m \cdot T_{\text{coupling}} = P_{\text{coupling}}$ )。 |
| $q$                   | 交轴量的符号。                                                               |
| $R_{\text{m}}$        | 激磁电阻, 对应于铁耗。                                                          |
| $s$                   | 转差率 $= (n_s - n)/n_s$ 。                                               |
| $S$                   | 标么值相对运动 $n/n_s$ ( $= 1 - s$ )。                                        |
| $T_{\text{coupling}}$ | 机械轴耦合转矩。                                                              |
| $T_{\text{loss}}$     | 电机内总损耗转矩。                                                             |
| $T_s$                 | 电磁转矩, Nm。                                                             |
| $T_m$                 | 机械转矩, 稳态时 $= T_s$ 。                                                   |
| $v$                   | 速度, m/s。                                                              |
| $V$                   | 在电路或电机接线端子量到的电压。                                                      |
| $x$                   | (或 $x_1, x_2, x_{s1}$ 等) 漏电抗。                                         |
| $X$                   | 一般电抗符号。                                                               |
| $X_m$                 | 激磁电抗。                                                                 |
| $X_{ms}$              | $X_m$ 的饱和值。                                                           |
| $X_{mu}$              | $X_m$ 的不饱和值。                                                          |
| $X_s$                 | 同步电抗 $= X_m + x_{s1}$ 。                                               |
| $z_s$                 | 每相或绕组每条并联支路串联导体数。                                                     |
| $Z_s$                 | 同步阻抗。                                                                 |
| $\alpha$              | 一般角。槽角。阻抗角 $\text{tg}^{-1} R/X$ 。触发延迟角。                               |

|                |                                                  |
|----------------|--------------------------------------------------|
| $\propto$      | 表示“正比于”。                                         |
| $\delta$       | 负载角。斩波器暂载率。                                      |
| $\delta_{fa}$  | (或 $\delta_T$ ) 矩角。                              |
| $\eta$         | 效率。                                              |
| $\Lambda$      | 磁导, $\text{Wb}/\text{At}$ 。                      |
| $\mu_0$        | 磁常数 $= 4\pi/10^7$ 。                              |
| $\mu_r$        | 相对磁导率。                                           |
| $\mu$          | 绝对磁导率 $= B/H = \mu_0\mu_r$ 。                     |
| $\varphi$      | 功率因数角。注意: 必须与下面磁通的符号 $\phi$ 区别开。                 |
| $\phi$         | 磁通的瞬时值。每极磁通, $\text{Wb}$ 。                       |
| $\phi_m$       | 互感磁通, 由合成磁势产生, $\text{Wb}$ 。                     |
| $\Phi$         | 磁通时间相量。                                          |
| $\theta$       | 用电弧度表示的轴位角, ( $\theta_m$ 机角)。温升。一般变量。            |
| $\dot{\theta}$ | 轴转速, 电弧度/s。                                      |
| $\tau$         | 时间常数。                                            |
| $\omega$       | 旋转时间相量的角速度 $= 2\pi f$ , $\text{rad/s}$ 。         |
| $\omega_m$     | 机械角旋转速度 $= 2\pi n$ , $\text{rad/s}$ 。            |
| $\omega_s$     | 同步角速度 $= 2\pi n_s = 2\pi f/p$ , $\text{rad/s}$ 。 |

**注意:** 除了有特别说明的, 象标么值量的情况和所谓的工程单位, 即  $1\text{Hp} = 746\text{W}$ ,  $1\text{ 磅力英尺} = (746/550)\text{Nm}$  之外, 本书一律采用国际单位制 (SI)。

# 目 录

符号表

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第一章 引言和基本理论</b> ..... | I   |
| 1.1 本书的宗旨 .....          | 1   |
| 1.2 基础理论 .....           | 3   |
| 1.3 等效电路 .....           | 15  |
| 1.4 能流图 .....            | 20  |
| <b>第二章 变压器</b> .....     | 23  |
| 2.1 方程的求解 .....          | 23  |
| 2.2 对称分量法 .....          | 41  |
| <b>第三章 直流电机</b> .....    | 45  |
| 3.1 方程的复习 .....          | 45  |
| 3.2 方程的求解 .....          | 47  |
| 3.3 标么值 .....            | 63  |
| 3.4 串励电动机 .....          | 73  |
| 3.5 制动电路 .....           | 87  |
| 3.6 永磁电机 .....           | 93  |
| <b>第四章 感应电机</b> .....    | 100 |
| 4.1 方程的修正 .....          | 100 |
| 4.2 方程的求解 .....          | 105 |
| 4.3 定子恒流运行 .....         | 133 |
| 4.4 不平衡和单相运行 .....       | 151 |
| 4.5 通过转差功率转换实现转速控制 ..... | 158 |
| <b>第五章 同步电机</b> .....    | 166 |
| 5.1 方程概要 .....           | 166 |

|             |                                               |            |
|-------------|-----------------------------------------------|------------|
| 5.2         | 方程的求解 .....                                   | 171        |
| 5.3         | 标么值 .....                                     | 180        |
| 5.4         | 机电问题 .....                                    | 182        |
| 5.5         | 恒流运行 .....                                    | 201        |
| 5.6         | 圆图 .....                                      | 213        |
| 5.7         | 多机问题 .....                                    | 216        |
| 5.8         | 凸极电机和磁阻电机 .....                               | 221        |
| <b>第六章</b>  | <b>暂态特性</b> .....                             | <b>230</b> |
| 6.1         | 暂态方程 .....                                    | 230        |
| <b>第七章</b>  | <b>电力电子电路和电机拖动</b> .....                      | <b>274</b> |
| 7.1         | 斩波器控制的直流电机 .....                              | 275        |
| 7.2         | 可控硅变换装置和直流电机拖动 .....                          | 283        |
| 7.3         | 交流电机的电力电子电路控制 .....                           | 289        |
| 7.4         | 采用电力电子电路控制的直流电机拖动、交流电机拖<br>动以及同步电机拖动的比较 ..... | 297        |
| <b>第八章</b>  | <b>电机系统的数学和计算机模拟</b> .....                    | <b>303</b> |
| 8.1         | 逐步求解法的编排 .....                                | 303        |
| 8.2         | 多相交流电机的模拟 .....                               | 306        |
| 8.3         | 斩波器控制直流电机的模拟 .....                            | 321        |
| 8.4         | 可控桥控制直流电机的模拟 .....                            | 339        |
| <b>附录 A</b> | <b>桥式整流电路的电压、电流和功率</b> .....                  | <b>348</b> |
| <b>附录 B</b> | <b>交、直轴方程模拟概要</b> .....                       | <b>353</b> |
| <b>附录 C</b> | <b>练习题及答案</b> .....                           | <b>360</b> |
| <b>参考文献</b> | .....                                         | <b>408</b> |

# 第一章 引言和基本理论

## 1.1 本书的宗旨

初学电机的学生会遇到许多以前学习数字系统所不曾遇到的概念上的困难，因为数字系统只有简单准确的两种工作状态。要使初学者有信心研究非线性、三维、旋转电磁设备，需给予更多的帮助。本书的目的就是帮助了解如何使用在功率传递、基本电路及电磁理论基础上导出的方程，准确地表达和预测机电性能。

为使计算的功率输入输出特性在工程上与设备本身的特性尽量接近，我们可以把电机表示成简单的电路——等效电路。这一概念在许多书，例如作者的《电机及其应用》中都有说明。虽然在《电机及其应用》一书中给出了详细的理论陈述，但本书的有关部分可看作是对《电机及其应用》一书相应部分的修订。概括地说，这个扩充了的第二版，可认为是一本通过例题教学的“电力拖动”教科书，适合于已有一些基本电机理论的读者。

应当指出，电机性能的完全准确的分析由于太复杂而实际上不可能做到。对进行深入研究从而进一步提高准确度。这一工作感兴趣的主要是专业设计人员。他们必须保证设计的产品既满足用户的需要而又不易损坏，而且必须判断什么时候进行复杂分析是合算的。对于用户和还不是专家的工科学生，作为一般了解，为以后从事专业工作提供所需入门知

识，使用较简单适用的办法已能满足要求。

各种类型的电机有许多特点是共同的，最明显的例子是机械轴方程。此外所用的基本电磁定律，输入输出关系和运行方程也有许多相似之处，这就有可能把它们集中放在第一章。为了提示一下需要的基础知识，也简要地讨论了一些基本的机械、磁路和电路理论方面的知识。同学们千万不可低估这一部分内容的重要性。经验证明，正是对这些关键的地方的不正确理解，将会妨碍以后理解电机习题。

但是，检验一个学生是否能胜任工程师的工作是应用他掌握的理论知识去处理工程问题的能力。当一个学生亲自动手选择方程，并在这个方程的代数表达式中代入数值，对一个问题求出答案时，他已开始向着这个目标前进。这就是利用数字题作练习的重要性所在。一个人的理解力与他处理已建立的方程的能力成正比，因为方程是以数学形式描述物理特性，所以实际上可以用方程按系统的方式解决这样的问题。这后一句话的正确理解是成功解题的关键。

各章习题安排由浅入深。在每章开头或作者认为需要的地方在对方程的讨论中给出了许多理论依据。在解题过程中指明了问题的类型，对三种基本类型的旋转电机：直流电机、异步电机和同步电机来说，这些问题都可以用公式来表示。本书鼓励读者采用一种有序解题法，例如在一个图上填入问题数据。解电机习题的难点之一常常是给出的数据较多，特别是在解三相电路问题时，如果我们把数值放在一个简单的图上就比较容易归并，且有助于避免表达式上的错误，通过采用这种推荐的模式，希望本书将有助于消除一些学生对电机领域的神秘感。

本书的重点放在从电机端子外部得到的电机的特性，而

不是把重点放在电机内部的电磁设计。换句话说，电力拖动方面最为重要，因为这是大多数工科学生需要有良好知识的领域。值得注意的是，大约60%~70%的电力消耗在由电动机拖动的机械传动装置上，而实际上，这些电力又是通过机械轴驱动的发电机所产生，所以，这个课题对于工程技术人员也是十分重要的。书中讨论了有关问题和解法，并在适当的地方引出了工程结论。如果不忽略机电暂态过程，并考虑由电力电子控制而产生的影响，一般情况下，通常的分析方法在预测电机性能方面仍然十分有效。有些时候，谐波的作用十分明显，全面考虑谐波的影响，有些超出本书的范围，但本书对研究这种情况下的电机问题所使用的方法给予了适当的说明。详细研究电机/半导体系统需要数学和计算模拟方面的知识。第八章以足够的深度讨论了这个课题，使读者真正理解并为进一步专门研究打下坚实基础。最后，附录C给出了一些练习题，并附有答案。本书中的一些例题取自《电机及应用》一书的附录E，但还有许多题留下供有志于深入研究的学生进一步练习。

## 1.2 基础理论

### 励磁计算

实际上所有的电机在其磁路中都有铁心，因为这样可以增大磁通，减少需要的激磁磁势。虽然铁心有以上优点，但也出现了铁心损耗和非线性问题。图1.1a表示典型的铁心磁化特性，经济的工作点在直线段和完全饱和之间，大致在 $B=1\text{T}$ 附近，但某些磁路部分，象电枢齿，可以超过这个值50%或更多。在暂态情况下也可能超过这个限量。决定所需激磁磁势的方程可以从下式得出：

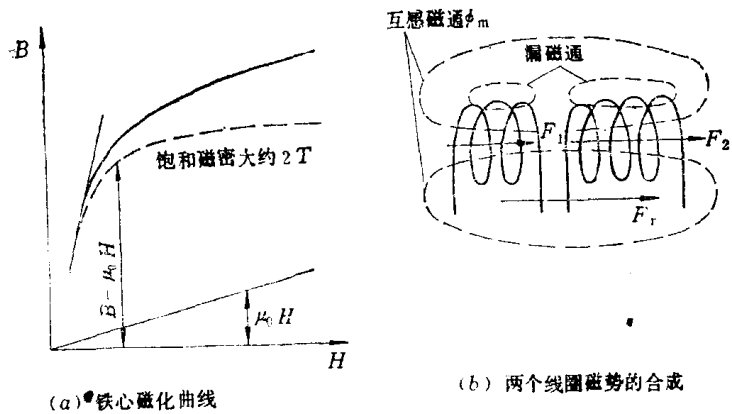


图 1.1 磁化

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H = \mu IN / l$$

乘以面积  $A$  :

$$B \times A = \mu \frac{IN}{l} \times A = IN \times \frac{\mu A}{l}$$

用文字表示:

$$\text{磁通} = \text{磁势} \times \text{磁导} \quad (1/\text{磁阻})$$

$$\phi (= BA) = F (= IN) \times A (= \mu A / l)$$

磁势用安匝表示 (At), (匝数  $N$  无量纲) 而实际上是包围磁路的电流。

对于给定磁通和磁路几何形状而确定线圈结构的情况常需计算磁势。通常有两个 (或更多) 这样的线圈, 结果, 产生磁通  $\phi_m$  的励磁磁势  $F_r$  就是  $F_1$  和  $F_2$  的合成。见图 1.1b。这两个磁势可以在电机气隙相对两侧产生, 比如,  $F_1$  由几个定子线圈产生。而同样  $F_2$  可以由若干转子线圈产生。常常假设磁势为正弦分布, 通过设计线圈可使磁势分布更接近假设。在计算合成磁势时可以利用“矢量”法把这两个“正弦量”

合并, 得出  $F_1 + F_2 = F_r$ , 并且互感磁通  $\phi_m$  是  $F_r$  的函数, 即  $\phi_m = f(F_r)$ 。但磁势不是矢量而是标量, 所以采用另一个不同的术语“空间相量”表示它是一个正弦空间变量。如果把  $F_1$  和  $F_2$  的正磁化方向取在同一方向上有时很方便。尽管实际上, 常常是一个与另一个的磁化方向相反, 则相对这一个, 另一个应为负。

### 电磁理论

基于我们的目的, 最重要的方程是:

$e = N d\phi/dt$ ;  $e = Blv$ ;  $F_{oro} = Bli$ ; 在实际电机中,  $B$ 、 $v$  和  $i$  的方向常常是相互正交。

在磁路几何形状固定的情况下:

$$e = N \frac{d\phi}{di} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

$$\text{式中 } L = N \frac{d\phi}{di} = N \frac{i N A}{i} = N^2 A$$

它将随着开始饱和而下降, 所以电感  $L$  是与磁通/电流有关的。对于随时间正弦变化的电流:

$$i = \hat{I} \sin 2\pi f t = \hat{I} \sin \omega t$$

则:

$$e = L \times \omega \hat{I} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

用有效值和复数表示:

$$E = j\omega L I = jX I = V$$

$I$  滞后  $V$ 。这些量是标量, 但其按正弦规律变化, 所以可用时间相量表示, 见图1.2。本书中“相量”一词常被用作“时间相量”的简写。使用反向电势表达式  $\left( + L \frac{di}{dt} \right)$  而不使用

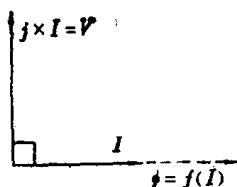


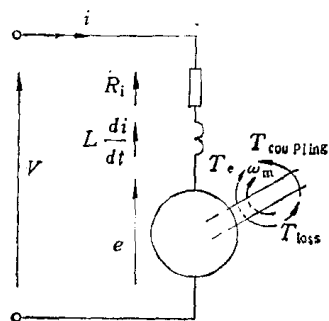
图 1.2 感应电压 (反向电势)

正向电势表达式  $\left(-L \frac{di}{dt}\right)$  在实际应用中更方便, 因为对于电感电路可直接显出电流  $I$  滞后  $\mathcal{V} 90^\circ$ , 而不必涉及两个电压大小相等但相位相反的概念。

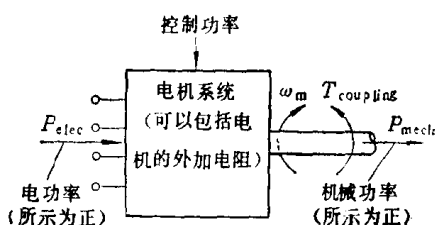
对于磁路几何形状变化的一般情况,  $e = d(Li)/dt = L di/dt$  (变压器电势)  $+ i dL/dt$  (运动电势)。

### 电路理论惯例

图1.3a表示一台具有瞬时电势、电阻和电感压降的电机。电压箭头是假定的正端。对于瞬时端电压  $v$  和电势  $e$ , 箭指方向可以任意规定, 但  $Ri$  和  $L di/dt$  必须与  $i$  反向, 因为对正  $i$  和对正  $di/dt$ , 电压箭头必须是正。 $i$  的方向也可以任意规定, 但与  $v$  和  $e$  方向有关时, 如何规定却有一定关系的。如图所示, 假定所有量都为正, 则电机是一个功率接收器, 即电机处于“电动机”运行方式, 乘积  $vi$  和  $ei$  为正。对



(a) 电路



(b) 系统

图 1.3 电动机惯例

于“发电机”，则电机成了一个电源， $ei$ 将为负。 $e$ 或 $i$ 反向。

上述规定称为电动机惯例，在电力拖动系统的研究中始终使用这个惯例并令负的 $ei$ 乘积表示发电状态，这是很方便的。或者，也可以使用发电机惯例，在对电力系统的研究中有时更愿意使用这个惯例。比如说改变 $i$ 的方向，对于发电状态 $ei$ 将为正，且电路方程中会有一个相反的符号。不知你是否真正理解了上面的意思，完成下面的简短练习对你是一个很好的检验。

|          |         |              |
|----------|---------|--------------|
| 写出电动机方程； | 按电动机惯例： | $V = E - RI$ |
| 写出发电机方程； | 按电动机惯例： | $V = E - RI$ |
| 写出发电机方程； | 按发电机惯例： | $V = E + RI$ |
| 写出电动机方程  | 按发电机惯例  | $V = E + RI$ |

将上述方程简单推广便可以表达机械方程。电动机（作为机械动力源）产生电磁转矩 $T_e$ ，在稳速平衡状态，这个转矩被总机械转矩 $T_m$ 所平衡， $T_m$ 中包括内部机械阻转矩 $T_{Loss}$ 和耦合“端”的负载转矩 $T_{coupling}$ 。所以：

$$T_e = T_m = T_{coupling} + T_{Loss}$$

（比较电源， $E = V + RI$ ）

这也是一个电动机惯例。对于发电机，转向不变的情况下，采用这个惯例 $T_e$ 和 $T_{coupling}$ 两者都将为负。

为了说明这些惯例如何影响作为一个系统考虑的电机，采用电功率端和机功率“端”一先不考虑控制功率端，如图