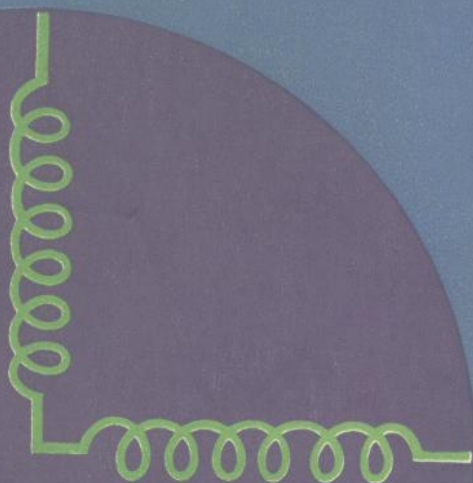


电机的 矩阵分析

[英] N. N. 汉可克 著



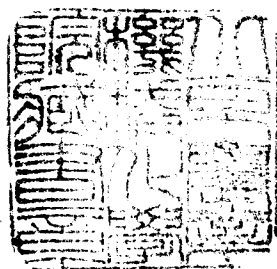
科学出版社

77153
1

电机的矩阵分析

〔英〕N. N. 汉可克 著

李发海 郑逢时 张麟征 译



科学出版社

1980

内 容 简 介

本书是英国曼彻斯特大学理工学院的研究生教材。全书共分十四章，第一至第四章主要介绍矩阵代数及其在静止网络和变压器中的应用。第五至第八章主要讨论旋转电机的一些共同问题，如转矩问题、坐标轴转换问题、以及特性计算等问题。第九至第十四章主要运用矩阵方法分析了各类旋转电机在稳态和暂态(对称和不对称)情况下的特性，包括直流电机、单相交流整流子电机、异步电机、同步电机、交磁放大机、功率自整角机等，重点放在同步电机和异步电机的分析上。书后附有习题及答案。本书对电机专业的高年级大学生、研究生，以及从事电力工程的科技人员、教师，均有参考价值。

N. N. Hancock

MATRIX ANALYSIS OF ELECTRICAL MACHINERY

2nd Edition

Pergamon Press, 1974

电 机 的 矩 阵 分 析

[英] N. N. 汉可克 著

李发海 郑逢时 张麟征 译

*

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

*

1980年8月第一版 开本：850×1168 1/32

1980年8月第一次印刷 印张：11 1/2

印数：0001—7,200 字数：297,000

统一书号：15031·284

本社书号：1756·15—5

定价：1.70 元

译 者 前 言

运用矩阵方法研究和分析电机的特性,已有多数,并显示了它的优越性。与同类书籍相比,汉可克(N. N. Hancock)著的《电机的矩阵分析》一书,具有联系一般电机学理论、由浅入深地进行论述的特点,曾作为英国曼彻斯特大学理工学院的研究生教材。该书前后出了两个版本,1974 年的第二版比 1964 年的第一版作了修改和补充(见第二版和第一版序言),本书系按第二版译出。全书共分十四章,第一至第四章主要介绍矩阵代数及其在静止网络和变压器中的应用。第五至第八章主要讨论旋转电机的一些共同问题,如转矩问题、坐标轴系转换问题以及特性计算等问题。第九至第十四章主要运用矩阵方法分析了各类旋转电机在稳态和暂态(对称和不对称)情况下的特性,包括直流电机、单相交流整流子电机、异步电机、同步电机、交磁放大机、功率自整角机等,重点放在同步电机和异步电机的分析上。书后附有习题及答案。本书可供电机专业的高年级大学生、研究生以及从事电力工程的科技人员、教师参考之用。对初步掌握了电机学理论而想进一步学习电机矩阵分析的人员,更为适宜。

原书有些地方过于简练,为了帮助读者理解,译者作了补充说明,并加以注明。书后附有索引,为了便于读者查阅,索引按中文笔划顺序排列,以中英对照方式编印。

本书由清华大学电力系李发海、郑逢时、张麟征合译,其中第一章至第五章由李发海翻译,序言及第六章至第十章由张麟征翻译,第十一章至第十四章以及附录、索引由郑逢时翻译。全书由张麟征整理和统一。本书完稿后,曾请高景德教授进行了审阅和定稿,在此表示衷心的感谢。

由于我们水平不高,书中可能还会有错误,请读者指正。

译 者

第二版 作者序言

自本书第一版发行以来,虽然过了十年,著者仍然相信,从教学的角度看,按矩阵分析研究电机比按张量分析较为优越。矩阵分析方法可以应用于实际问题,早已为人们所熟知;后来,正式阐述它所基于的原理的要求就可能被提出来。正如吉布斯(W. J. Gibbs)博士所指出的,这种情况令人欣然回忆起莫里哀所著的《醉心贵族的小市民》(*Le Bourgeois gentilhomme*)一书中茹尔丹(M. Jourdain)先生的事情——他说了很长时间的散文,自己一点还不知道。

象第一版那样,第二版的对象是已了解了一些或同时正在学习电机性能知识的读者。当读者还未具有一定的电机“经典”理论知识时,为了方便这些读者,有时注出参考文献,特别是注出丛书中的姊妹篇:欣德马煦(J. Hindmarsh)著的《电机及其应用》。

与第一版比较,有四个方面的改动。第一,对以前留给读者的一些问题,本版作了更明确的阐述,其中有单位、转矩方向和用分块法完整地求逆的陈述。第二,纠正了以前在判断上的两个错误,一是为了简化起见,在同步电机中,忽略了所有的漏磁,结果证明这样的忽略是过分简化了;二是,考虑到三相电机与两相电机的关系较为简单,所以只满足于考虑两相电机,而忽视了对三相电机的分析。第三,是属于论述方面的改进,更换了主要例题,更加完善了对异步电机的分析,不再采用易出差错的半变换等。第四,增加了若干内容,特别是阐明电机绕组内部联接和小值振荡方面的问题。另外,还增编了习题的提示和答案。

上述变动,一部分起因于著者在曼彻斯特大学理工学院(UMIST)对大学生讲授这一课题中进一步得到的经验。其他的

是采纳了读者来信提出的意见,为此,著者对他们表示感谢。著者特别要指出,得到欣德马煦先生的帮助,他多次中肯地指出著者未觉察出来的不足之处。

最后,著者对丛书总编辑哈蒙德(P. Hammond)教授在一些方针性问题上所给予的教益表示感谢。

第一版 作者序言

电机运行特性的系统分析,是由加布里埃尔· Kron (Gabriel Kron) 首先倡导的. 在他的早期著作中,针对不同的读者: 数学家或是工程师,用了不同的方法,来论述这个课题. 甚至在他的后期著作中, Kron 再三引用的数学概念也超出了一般电气工程师和大学生的直观经验. 卡拉皮托夫 (Karapetoff) 在美国和吉布斯 (Gibbs) 在英国都已指出,应用于电机中的大多数方法,甚至可以不提“张量”这个词而导得. 所需的知识只是电路方程,基础的矩阵代数,以及用任何变量表示其系统的功率都必须相等的原则. 这个原则对电气工程师来说,并不新奇,他们在变压器或异步电机中,常常将副边量折算到原边.

著者在 1950 年有幸听了吉布斯博士关于电机的矩阵分析一题的讲演,因而受到鼓舞而从事这方面的研究. 结果,在最近的十年中,这一专题已成为曼彻斯特理工学院研究生课程的一部分,而最近已作为大学生的课程. 本书大部分是在这个实践基础上写成的.

著者认为,对于非专家和专家来说,这都是分析电机运行性能的最好方法,而对专家来说,当他面对更复杂的运行问题时,他也会从中找到较好的方法. 电机设计只是专家的工作,它的目的是要求制造一种具有一定参数的电机. 通过对这些参数的分析,可以得出需要的运行性能. 这一工作和磁通的概念紧密相依,可是,在本书中介绍得很少.

限于篇幅,对有些课题,特别是对小值振荡,在此未加论述,而对电机绕组的内部联接也只作了简短的叙述. 不过,也作了一种尝试,那就是运用矩阵的方法,分析了大学课程中通常包括的电机

性能的大部分课题,也包括一两个更深入的问题,以表明这种方法的威力和局限性。

如果著者不表达在编写本书的过程中,曾得到吉布斯博士及他的同事欣德马煦(J. Hindmarsh)先生和怀特黑德(R. W. Whitehead)先生的帮助而结束这个序言,那是不合适的。他们的建设性意见,已屡使本书的阐述更为完善。

目 录

第二版 作者序言	vii
第一版 作者序言	ix
第一章 绪论	1
惯例	1
单位	3
参数	3
第二章 矩阵代数的基本原理	5
联立方程的矩阵表示	5
矩阵乘法	6
应用矩阵解联立线性方程——求逆	8
奇异矩阵	10
乘积矩阵的转置及求逆	11
求逆的其它方法	11
复合矩阵	12
线性转换	16
简化成对角线形式	16
矩阵的优点	17
矩阵的类型	18
矩阵的微分与积分	20
第三章 矩阵代数在静止网络中的应用	21
拉氏变换方程	21
标志法	23
电路分析的线性转换	24
转换的选择——功率不变性	32
在给定电流转换的条件下, 根据功率不变原则求电压与阻抗的转换	32
第四章 变压器	36

双绕组变压器	36
参数	39
三绕组变压器	42
参数	47
更复杂的磁路	47
第五章 基本型旋转电机的矩阵方程	51
基本型整流子电机的矩阵方程	51
滑环式和鼠笼式电机的矩阵方程	53
具有均匀气隙的对称两相电机(异步电机)的矩阵方程	55
对称两相旋转电枢式凸极电机(同步电机)的矩阵方程	62
转换后的阻抗矩阵的形式	70
方法的局限性	73
第六章 转矩的表达式	76
磁场中储存的能量	76
转矩的表达式	79
由方程 $\mathbf{v} = \mathbf{R}\mathbf{i} + p(\mathbf{L}\mathbf{i})$ 得出转矩表达式的推导	79
$\partial \mathbf{L} / \partial \theta$ 的转换	83
由方程 $\mathbf{v} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{L}p\mathbf{i} + \mathbf{G}\dot{\theta}\mathbf{i}$ 得出转矩表达式的推导	85
交流电机的平均稳态转矩	88
转矩的方向	88
第七章 电路及电机中用的线性转换	90
转子磁动势的分解	92
两组静止轴之间的转换(电刷移动时的转换)	93
三相与两相系统的等效性	95
从三相到两相轴系的转换(从 a, b, c 到 α, β, o)	96
从三相轴系到对称分量轴系的转换(从 a, b, c 到 p, n, o)	101
从两相轴系到对称分量轴系的转换(从 α, β, o 到 p, n, o)	104
稳态及瞬时值对称分量	107
从两相旋转轴系到静止轴系的转换(从 α, β, o 到 d, q, o)	109
从三相旋转轴系到静止轴系的转换(从 a, b, c 到 d, q, o)	112
从静止轴系到前进及后退轴系的转换(从 d, q, o 到 f, b, o)	113
定子绕组轴系的转换	114
各种轴系的物理解释	115

转子	115
定子	115
第八章 矩阵方法在常规特性计算中的应用	118
瞬变阻抗矩阵的建立	118
复数矢量图及等效电路	121
复数矢量图	121
等效电路	122
电机之间或电机与其他电路元件之间的内部联结	122
闭合电路	123
问题的具体类型	123
(a) 给出全部载流绕组的端电压,求诸电流	123
(b) 给出全部载流绕组的端电压,求开路绕组的端电压	124
(c) 给出某些绕组的端电压和其他绕组中的电流,求其余的电 流及电压	125
(d) 给出端电压,求用速度或相角表示的转矩	125
(e) 给出端电压,在某给定的转矩下,求速度与(或)电流	126
三相电机的分析	126
零序电流的作用	127
第九章 直流电机及单相整流子电机	133
串激整流子电机	133
并激整流子电机	136
直流并激电动机	137
开路时的直流并激发电机	139
带电阻负载的直流并激发电机	140
直流电机的参数	144
并激及他激直流电机	144
直流串激电机	146
排斥电动机	146
用复数关系表示的稳态特性	150
稳态瞬时电流及转矩	151
第十章 多相电机的稳态特性	156
对称的多相异步电机	156
电流	160

等效电路	162
转矩	164
对称的端电压	167
不对称的端电压	168
参数	168
不对称的两相异步电机	170
等效电路	175
电流	176
转矩	177
异步电机的单相运行	177
三相电机	177
两相电机	180
单相电机	180
参数	180
均匀气隙及无阻尼绕组的多相同步电机	181
复数矢量图	186
给定电枢端点情况所要求的激磁电流	186
转矩	188
参数	188
凸极及无阻尼绕组的多相同步电机	190
开路情况	192
短路情况	193
作为带对称负载的发电机	196
复数矢量图	202
转矩	205
参数	211
第十一章 交流电机的瞬变及负序情况	215
对称异步电机的瞬变过程	215
端电压的突然加上	218
无阻尼绕组的凸极同步机	220
开路时的突然三相短路	223
激磁电流	225
电枢电流	227

负序阻抗	232
对负序电流的阻抗	233
对负序电压的阻抗	236
有阻尼绕组的凸极同步电机	240
对称的稳态情况	243
瞬变情况	244
开路时的突然三相短路	245
负序阻抗	249
参数	250
第十二章 小值振荡	251
他激直流电机	253
对称异步电机	257
同步电机	266
第十三章 其他种类的电机问题	272
交轴电刷有偏移的交磁放大机	272
费拉里斯-阿尔诺 (Ferraris-Arno) 变相机	276
副边为单相的多相异步电机	283
转矩	287
功率自整角机	290
均匀气隙及无阻尼回路的同步发电机的单相运行	303
第十四章 结论	307
附录一 转子绕组的限制条件	308
附录二 饱和时的转矩	311
多回路装置的转矩	315
转矩的计算	315
附录三 各轴系的定义	317
附录四 一些三角公式	320
拉氏变换	321
习题	322
习题的提示和答案	328
参考文献	341
中英名词对照索引	343

第一章 绪 论

粗略一看会得到这样的推断,即前面几章包括了一些必要的资料,从第九章开始才具体地考虑电机的性能,可是已经过了书本的一半.为了看看矩阵代数是怎样应用的,有些读者自然就想跳过前面一半.对此不必认真反对,可以回过头来再读前面的部分.不过,建议在跳到第九章之前,至少要把第一、第二章和第五章的第51—53和62—73页先学习一下.对多数系统学习的学生来说,最好按这样一个不太激动人心的顺序读下去,即从着手研究这种方法的第二章开始,不要跳过任何内容.除非他对变压器不感兴趣,才可以越过第四章.

惯 例

尽管惯例本身没有实质性的意义,但在全部的数学分析中,它还是极其重要的.为了尽可能保持惯例的前后一致,在这里,对它们复述一下是适当的.

(1) 在滑环电机的电路图里,转子绕组用一个圆圈表示,它既代表了实际的绕组,又代表了经过转换后的静止绕组.对于后者来说,有的作者用径向的直线和有径向线或没有径向线的电刷来表示.对带整流子的绕组,用有径向线或没有径向线的电刷来表示.仅当需要表明电刷不在对称轴线上时,径向线才是必不可少的.

为了简单起见,用螺线圈表示的转子绕组只占直径的一半,定子绕组只在电机的一侧表示.对表明任意选择的电流和磁势的正方向来说,这是需要的.电流和磁势的正方向,在这两种情况下,都是沿着径向向外的.实际的电机绕组(如果是对称的)总是占满了整个圆周表面.转子的相绕组,尽管在某些图里是联在一起的,

但在实际上,他们未必是联接在一起的。

(2) 在电路图中,电流和磁势的正方向都用电流的箭头表示。电压箭头的方向表示端电压的“升高”,其它在电流箭头方向上的电压,则是“降低”。

(3) 转子旋转的正方向选为逆时针方向,因为这是正值角度的量测方向。有时这种规定可能与电流和磁势的正方向惯例发生矛盾,但在这种情况下,负号的出现将表明电动机转矩是顺时针的。

(4) 小写的 v 和 i 表示端电压和电流的瞬时值。为了避免出现 $\sqrt{2}$, 用 $\hat{v}$ 和 $\hat{i}$ 表示正弦电压和电流的幅值,留下 V 和 I 来表示稳态直流值和交流的有效值。

(5) 大写的 L 和 X 表示自感和相应的电抗。自感与互感的差 ($L - M$) 用小写的 l 表示,同样的,全电抗与互电抗之差 ($X - X_M$) 用小写的 x 表示。如果把所有的量都折算到同一基值时, l 和 x 分别是折算到那一基值时的漏电感和漏电抗。

这里用的电感值可以是实际值,可以是折算值。克朗 (Kron) 和别的一些作者用的是折算到单匝绕组时的值。虽然简化了磁导与电感之间的关系,但是,当有内部联接时,它将使问题变得复杂起来。

(6) 用粗黑字体区别矩阵与它的元素。因此就不能再用粗黑字体区别复数矢量与它的绝对值了,需要时,就用两条垂直的平行线来区别。

(7) 在电压和电流的符号上打一横表示电压和电流的拉氏变换。拉氏变换的复数用 s 表示,而微分算子 d/dt 用 p 表示。这种差别是合乎要求的,因为在某些情况下,在线性转换的过程中,还要进行实际的微分运算。

(8) 定子绕组回路的上、下标用大写字母,转子回路的上、下标用小写字母。

(9) 由于发电机和电动机之间的差别只在于运行条件的不同,所以,一般都按“电机”来分析。但是,必须在方程式

$$V = E + IR \text{ 和 } V = E - IR$$

中选择一个,不可能有折衷的办法。由于所有电动机绕组和某些发电机绕组是吸收功率的,因此,对大多数绕组来说,选择

$$V = E + IR$$

是合适的。

这样一来,在方程里的 E 就是电动机的反电势了。在本书中,它是以电压的形式出现的,并且是由电感、角速度和电流三者乘积决定的量。当它们的相应符号的乘积为正时,代表和电阻上的压降 IR 方向一致的电压降,也就是说,它是反电势。如果在一个电压方程里,不只是一个反电势时,在这种情况下,总电势是它们的代数和。

可以看出,电动机和发电机方程之间的差别,实际上是由电枢电流正方向的惯例不同而引起的,因此,得到了相反的符号。本书中用的全是电动机方程,而发电机运行状态则与直流电机电枢电流的负值和交流电机电流的有功分量的负值相对应。

单 位

本书中不涉及单位问题,但是都以国际单位制(SI 单位制)为假定的,即米、千克、秒和常用的电量单位,安培、伏特、欧姆、亨和法拉,以及功率的单位,瓦,能量的单位,焦尔和力的单位,牛顿。由于他们之间形成了一组一致的单位,就没有考虑常数或变换因子的要求了。

当然,角速度和角频率的单位是弧度/秒。

参 数

从电机参数物理意义的了解中,可以较好地提示出参数测量的方法。同样,观察回路方程也可启示测量方法,反过来,测量方法也能揭示有关参数的物理意义。另外,熟悉由经典电机理论得

出的测量参数的标准试验[†]的人,用本书叙述的回路方法,也能分析那些试验。这就能说明,两种不同理论所使用的参数,通常是一样的。实用上,这些不同的研究途径是不可能区别开来的。

[†] 参阅文献 [3]。