

交流电机统一理论

—在实际问题上的应用

[英]B.阿德金斯 R.G.哈利 著

机械工业出版社

交流电机统一理论

——在实际问题上的应用

〔英〕B. 阿德金斯 R. G. 哈利 著

唐任远 朱维衡 译

褚应璜 朱春甲 校



机械工业出版社

本书深入阐述了交流电机的统一理论及其在实际问题上的应用。前四章从分析理想化两极电机开始,推导出适用于所有正常类型电机和所有运行状态的统一的方程式。第五、六两章分析了运用现代计算技术和现代控制理论求解统一方程式的各种方法。第七章到第十二章研究了统一理论在同步电机、异步电机和其他类型电机许多典型的实际问题上的应用,论述了现代计算方法及其分析结果。书中介绍了在这方面的最新研究成果。

本书可供高等学校电机、电力、自动控制等专业的研究生和高年级学生学习使用,也可供有关专业的教师和科技工作者参考。

**The General Theory of
Alternating Current Machines;
Application to Practical Problems**
BERNARD ADKINS RONALD G. HARLEY
CHAPMAN AND HALL LONDON 1975

* * *

交流电机统一理论

——在实际问题上的应用

[英] B. 阿德金斯 R. G. 哈利 著

唐任远 朱维衡 译

褚应璜 朱春甲 校

*

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登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $9^{5/8}$ · 字数 210 千字
1980年1月北京第一版·1980年1月北京第一次印刷

印数 00,001—16,500 · 定价 0.90 元

*

统一书号: 15033 · 4735

原 序

B.阿德金斯所著《电机统一理论》一书，于1957年出版以来，得到了各方面的好评。这本书所论述的理论是计算电机性能的各种实用方法的基础。它可以当作一本手册用，也可以作为研究生的教科书。自从1957年以来，在电机理论的实际应用方面有许多重要的发展。其中最重要的因素是由于数字计算机的应用越来越广泛。而在1957年，数字计算机刚开始应用于解决电机和电力系统的问题。由于大多数最新的研究成就，特别是作者们所参与的研究工作，都是与交流电机有关的，因此，本书作为《电机统一理论》一书的最新改写本，主要是论述交流电机的问题。

第二章论述的是原型电机，其中在一定程度上也提到直流电机，这是因为正交磁场直流发电机可以对双轴理论起入门介绍的作用，并可对某些数学方法提供简明的物理解释。而且，有关的方程式还可直接应用于交流换向器电机。

在标题中使用“统一”(general)一词已受到某些人的非议。但是，使用这一字样决不意味着本书论述的内容包括得如此广泛(comprehensive)，以致任何一种可能的电机类型和各种问题都要涉及。使用这一字样的意思是指这种理论可以应用于所有类型的电机和所有的运行状态。当然，严格地说，这种理论并不能精确地应用到任何一种电机，而只适用于与实际电机相似的理想模型。

全部电机可以分为三类：

1. 运用这些理论并根据设计数据可以精确地预测其特性的电机；

2. 运用这些理论可以帮助理解有关问题，但据以计算的结果有较大误差的电机；

3. 不能有效运用这些理论的电机。

现今所使用的大多数同步电机和异步电机属于第一类，这主要是因为在设计过程中已设法消除了谐波和其他因素，这些因素形成了实际电机和理想化电机之间的差别。

尽管本书主要是论述双轴理论及其发展，但已把“统一化”的内容扩展到其他座标系统，特别是其变量为交流电枢中实际相电流的座标系统。近几年来，广泛使用着大量的特殊电机，例如直线电动机、感应子交流发电机、磁阻电动机和新型的变极电动机。其中有的电机不能应用双轴理论，或者应用的结果十分不精确，但如运用以相方程式为基础的理论则可得到满意的结果。一般说来，没有计算机而要求解这些方程式是不切合实际的，而现在能很容易地把方程式编成计算机程序。至于饱和和涡流效应则可以在第十章所阐述的理论范围内进行处理，而在某些特殊电机中，计算结果十分不精确。由于上述理由，作者们认为继续使用“统一”字样是完全合适的。

为了在数学上更加严格，在求解线性方程式时引入了拉普拉斯 (Laplace) 变换式。然而，亥维赛 (Heaviside) 公式 (在公式中把符号 p 当作算子看待) 则既可用于线性和非线性方程式的初始表达式中，又可用于运算传递函数和等效电路中。

由于计算机的广泛应用所引起的另一个变化是引入了现代控制理论中的某些内容，把方程式表示成状态变量形式，

这将在第五章中进行简要说明。这一方法对于复杂控制系统和方程式为非线性的系统尤其适用。在第九章中给出了应用逐步计算法的一些例子。

为符合新的国际规范，本书中所用的符号已经进行了修改。使用**相量** (phasor) 这一术语代替**向量** (vector) 以表示代表正弦量的复数，而**向量**这一术语则用来表示一组状态空间变量。

近二十多年来，帝国大学 (Imperial college) 的一组研究人员利用微电机装备来研究关于交流电机、外部系统和有关装置的课题。他们也有机会研究有关工厂和发电站的大型电机试验结果。帝国大学的研究大纲仅是全世界许多这类研究活动中的一个。人们认为，利用这些研究成果是很方便的，这些成果在电机工程师协会 (I. E. E.) 的许多论文中已予刊载。这些方法的许多实际应用问题，在本书中也有所论述。如上所述，统一理论是可以普遍应用的，因而只需要提供少数几个有选择的实例。若将有关这一题目的所有的文献都列入参考文献目录，将过分冗长。但从本书所列文献的参考文献目录中可以找到许多其他的资料。

在理论推导方面的安排是：对于基本理论和最重要的公式将给出完整的解释；反之，对于与实际应用有关的许多理论只给出简要的说明，其推导过程在引用的参考文献中自有说明。

本书可供研究生和其他已经具备相当电机知识的人学习使用，因为书中对电机结构未加任何说明。学习本书所需要的数学知识有复代数、矩阵代数、拉普拉斯变换和其他一些在书中简略介绍的内容。

目 录

原序

绪论	1
第一章 统一理论的基础	5
1.1 理想化电机	5
1.2 双绕组变压器, 符号惯例和电量标么制的说明	14
1.3 旋转电机的磁动势和磁通	18
1.4 电机的电压和转矩方程式, 机械量的标么制	20
1.5 各种基本假定, 饱和、谐波、漏磁	27
1.6 参数的计算和测量	31
第二章 原型电机	33
2.1 正交磁场换向器电机的方程式	33
2.2 在简单直流电机中的应用	38
2.3 小变化和小振荡的方程式	40
2.4 直流发电机的突然短路	42
第三章 交流电机的稳态相量图	48
3.1 正弦磁动势和磁通波的空间相量表示法	48
3.2 异步电动机	50
3.3 均匀气隙同步电机	54
3.4 凸极同步电机	57
3.5 与外部电源相连的同步电机的特性	59
第四章 交流电机的统一方程式	64
4.1 用相变量表示的方程式	64
4.2 不同座标系统之间的变换	68
4.3 双轴方程式的直接推导	78
4.4 两个阻尼线圈的同步电机的简化方程式	87
4.5 等效电路, 运算阻抗和频率响应轨迹	91

4.6	两个阻尼线圈的同步电机的方程式小结	97
4.7	磁场绕组和阻尼绕组间有更准确耦合关系的改进的方程式	99
4.8	异步电动机的统一方程式	103
第五章	课题类型及其求解和计算的方法	108
5.1	课题分类和求解方法	108
5.2	用转子角 δ 修正的方程式	110
5.3	状态变量法和状态空间的概念	112
5.4	系统响应特性计算和稳定性概念	120
5.5	最佳化, 性能指标	127
5.6	研究瞬态的计算技术	130
第六章	同步电机的自动控制	136
6.1	概述	136
6.2	交流发电机的励磁控制	137
6.3	交轴磁场绕组, 分开式转子绕组的发电机	139
6.4	调速器	142
第七章	同步电机的交流运行	144
7.1	同步电机在同步转速时的稳定运行	144
7.2	同步电动机的起动	146
7.3	同步电机的负序电抗	154
7.4	相对于稳态的小变化	156
7.5	强迫振荡的近似分析方法	158
7.6	自由振荡, 静态稳定性	161
第八章	同步发电机的短路和系统的故障	171
8.1	空载同步发电机的对称短路	171
8.2	短路波形图的分析	178
8.3	负载同步发电机的短路	183
8.4	同步发电机的不对称短路	185
8.5	系统故障的计算	191

VI

8.6 负载的突然变化	205
第九章 需要逐步计算的同步电机课题	210
9.1 瞬态稳定性	210
9.2 与无穷大电网相连的同步发电机的摆动曲线	211
9.3 同步发电机失去同步, 对整流器励磁系统 的效应	215
9.4 控制输入量的最佳化	218
9.5 多电机系统的分析方法	219
第十章 饱和和涡流对电机性能的影响	225
10.1 概述	225
10.2 考虑饱和的方法	227
10.3 磁性材料中的涡流效应	232
10.4 转子导条中的涡流效应	247
第十一章 异步电动机	252
11.1 初级座标系统方程式的应用	252
11.2 次级座标系统的方程式, 方程式的复数形式	253
11.3 异步电动机的短路和故障电流	256
11.4 瞬态稳定性计算	263
第十二章 在其他型式电机中的应用	267
12.1 理论应用的分类	267
12.2 双轴理论的应用	268
12.3 相方程式的应用	274
第十三章 附录	276
13.1 交流量和瞬变量的复数表示法, 一般化相量	276
13.2 功率不变时电流与电压的变换式	278
13.3 运算法	280
13.4 标么制	282
索引	287
参考文献	297

绪 论

本书的目的是提出旋转电机的统一理论，使其应用于所有正常类型的电机和所有的运行状态。因此，这种理论比一般教科书中所阐述的普通理论要更为基本，应用更为广泛，它适用于所有的在圆柱面上形成交替磁极的电机。

电机的分析研究包括下列两部分内容：

1. 确定电机的基本特征，这是由若干称为电机参数的量来表示的。在计算时，通常假设这些数值是不变的，因而这些参数被认为是常数。

2. 用这些常数算出在给定外界条件下的电机性能。

本书所用“电机理论”这一术语涉及的仅是第二部分内容。这一理论从分析理想化电机（其特征由已知常数表示）开始，并提出计算其性能的方法。为了理论分析的需要，必须仔细地定义这些常数（主要是电阻和电感），并叙述清楚作为参数计算基础的原理。至于计算方法的细节，与上述第一部分内容有关，虽然对实际设计工作很重要，但形成了另一个专门的研究题目。

在普通教科书中，每种电机的理论都是根据其本身的特点建立的，很少涉及其他类型的电机。根据所建立的简单分析方法可以算出在特定条件下的电机性能。在这些理论中，重点在于分析稳定运行状态，并得出了图解法或分析计算法。对于交流电机来说，相量图（phasor diagram）应用得很广泛。这种普通方法的缺点在于：当需要分析新型电机、

不对称状态或瞬变状态时，必须全部重新开始。

在这里概略介绍一下电机理论的历史发展情况是有意义的。交流电机的早期理论是以相量图为基础的，并在制图版上用几何作图方法进行运算。接着是对等效电路进行研究，终于从大量可能的电路中选择了几个标准电路。下一个重要的进展是引用复数，这就是有名的“符号法”或“ j 法”。那时，代数法还没有正式引用，只作为帮助进行相量图或等效电路运算的一种辅助方法。现代的方法包括一些新的研究途径。在现代理论中，代数方程式被认为是基本的表示方法，而相量图和等效电路变为只适用于特殊情况的另一个可供选择的求解方法。使用代数方程式后，使电机理论和电路理论的惯用方法相一致，并导致产生适用于所有类型电机和所有运行状态的电机统一理论。

在某些假定条件下，可以把实际电机等效成一个理想化的两极电机，从而推导出一组基本方程式。通常，这些是微分方程式，其中外加电压等于随电流而变的几个电压分量的总和，或者外加转矩等于几个转矩分量的总和。在直流电机中，表示实际电流与电压和转矩关系的方程式通常是便于求解的。但对交流电机的大多数课题来说，方程式是复杂的和难以求解的，除非用数字计算机来求解。

然而，对于大多数实际的交流电机（包括一般的异步电机和同步电机）说来，在采用新的座标系统并引用某些假想电流和电压后，方程式可以大为简化。这些假想电流和电压与实际的量不同，但相互之间又有一定的关系。假想电流有它的物理意义，可认为是在假想绕组中流通的电流，而这些假想绕组的作用轴线是互成直角的两个轴，分别称为直轴和交轴。这就产生了交流电机的“双轴理论”，而所得到的方程

式与直流电机的方程式很相似。

由于双轴理论在实践中的作用很重要，所以本书用较大的篇幅来研究它的应用，特别是在研究同步电机和异步电机的实际问题上的应用。它发展的第一步是勃朗德尔 (Blondel) 的凸极同步电机稳态运行时的“双反应理论”。这个方法由陶赫蒂 (Doherty) 和尼克尔 (Nickle) 详细检查过，并发表了五篇重要论文^[5]。在韦斯特 (West) 的“交流电机的正交磁场理论”的论文^[2]中，未经验证提出设想，认为一个旋转的笼型绕组可以等效为有两对短路电刷的直流电机电枢绕组。派克 (Park) 所发表的三篇论文^[3、4和6]作出了很有价值的贡献。这些文献不仅发展了同步电机统一的双轴方程式，而且指出了如何把这些方程式应用到许多重要的实际问题中。派克的变换，在发展克朗 (Kron) 的统一理论方面提供了非常重要的基本概念。克朗的电机统一理论首先发表在“通用电气评论” (The General Electric Review) 的一系列论文中，而后发表在一本书^[8]中。有关这个题目的许多更新的书和论文，已列入参考文献。

在第一章中讨论一些总的问题之后，在第二章中研究原型电机的方程式和某些简单的应用。第三章和第四章发展了交流电机的理论，既应用实际的电枢变量，又应用了双轴变量。第五章和第六章提出与分析方法和自动控制有关的一些基本内容。而第七章到第十一章专门研究双轴理论在同步电机和异步电机中的许多实际问题上的应用。第十二章讨论其他不常用电机的问题，包括某些不能应用双轴理论的问题。四个简短的附录列出了电机理论常用数学方法的某些专门内容。

当能够列出令人满意的方程式和确定足够精确的参数时

——这两个问题同等重要——就可以应用数字算法或分析法来求得解答。分析法常可得出普遍适用的结果，而数字算法仅能适用于特殊的数值情况。因此分析方法仍是相当重要的。计算结果的精确度既取决于列方程式时使电机理想化所带来的误差，也取决于计算参数时的假设所带来的误差。

术语和符号

书中尽可能采用最新的国际标准所推荐的术语和符号。根据统一理论的需要来选择正负号的惯例，因此，方程式对发电机和电动机同样适用。在电的方面，它们与电路理论所建立的惯例相一致（参阅第 16 页的说明）。

书中广泛采用标么制，并在正文和 13.4 节中进行了特别仔细的说明。

（以下略）

B. 阿德金斯

R. G. 哈利

第一章 统一理论的基础

1.1 理想化电机

各种类型的旋转电机具有许多共同的特点。图 1-1 所示的典型结构有一个固定部件和一个旋转部件。固定部件在外面，旋转部件在里面，并由固定部件上的轴承支承。两个部件都有圆柱形铁芯，中间由空气隙隔开。主磁通 Φ 从一个铁芯出来，经过空气隙通向另一个铁芯，构成闭合磁路。有时，可以是里面的部件固定而外面的部件旋转。在特殊的情况下，两个部件都可以旋转。两个相距很近的圆柱形铁芯表

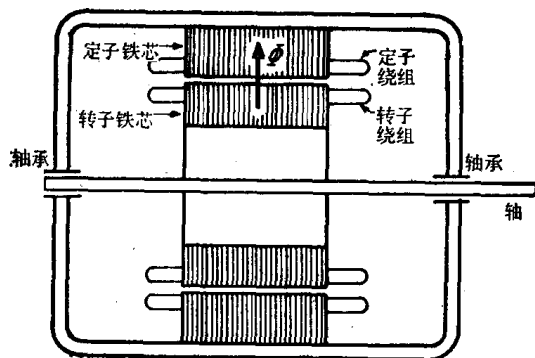


图1-1 表示所有电机共同特点的结构示意图

面进行相对运动是所有旋转电机的重要特点。任一部件的圆柱形表面有两种类型：有的仅为沿圆周均匀分布的小槽口所割开，分析时可以假想它是连续的；有的则分成偶数个凸极，极与极之间存在一定的空间。

在每个部件靠近表面的地方，沿着和圆柱体轴线平行的方向，安放有载流的导体。导体借助于在铁芯外面的端部连接形成线圈，而线圈连接起来形成电机的绕组。任一部件的绕组都包含有少数几个独立的电路。电机的运行首先取决于环绕铁芯表面的电流分布情况。所以，对绕组的分析只涉及这个分布情况，而端部连接的细节是次要的。因此，各种类型电机的一般布置是相同的，不同类型电机之间的基本区别仅在于绕组导体的分布情况不同和部件的表面情况不同（连续的或是具有凸极）。任何特定电机的运行还取决于接到绕组的外部电源电压的性质。

两个部件之间的狭窄的环形空间，通称为**空气隙**，这是电机的关键部位。电机统一理论主要研究空气隙中或其近旁的情况。实际上，磁通遍布于整个铁芯，分布的方式很复杂。但因为铁的磁导率高，因此，可以只研究空气隙中或其近旁的磁通分布情况，而使理论得到合理的简化和准确的结果。导体实际上并没有放在空气隙中，而是放在靠近空气隙的地方，它们或者放在叠片铁芯的槽中，或者放在凸极之间的空间内。尽管如此，研究统一理论时还是用放在铁芯表面的等效导体来代替实际的导体。通常假定等效导体的尺寸很小，它们或者位于槽中心处的铁芯表面上，或者位于凸极的边缘处。上述假定中未涉及到的另一个因素是与“漏磁”这一课题有关的，这将在后面的章节中进行比较详细的讨论。由于空气隙的径向长度很小，故对于任意的角位置来说，都可以举出其气隙磁通密度的确定的数值。

电机的主要结构可以用垂直于铁芯轴的横截面图来表示。这种平面图可以进一步简化为**展开图**，用来表示沿直线展开的空气隙周界的情况。例如，图 1-2 a 示出一台外面部

件具有凸极而里面部件为连续铁芯表面(在忽略槽口影响时)的六极电机的横截面图。图 1-2 b 是其相应的展开图,并展示出其磁通密度的基本正弦波。这种展开图实际上是直线电机的一个例子。

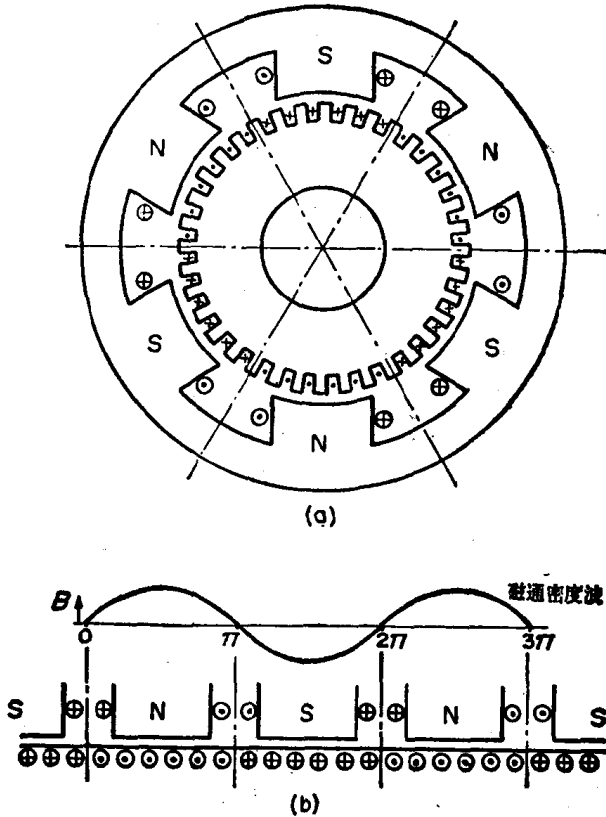


图1-2 典型电机

(a) 横截面图 (b) 展开图

不管电机的实际极数是多少,展开图上的磁通密度和电流的分布情况总是每两个极重复一次(由于分数槽绕组或交

错极引起的轻微变化，在研究统一理论时可以忽略不计)。因此，任何电机都可以用等效的两极电机来代替，而且只需要研究这样的电机。本书正是完全用两极电机来研究统一理论的。当然，在计算电机的某些常数，特别是研究象转矩和转速之类的机械量时，必须引入电机的极数。

1.1.1 绕组类型

电机的绕组有三种主要类型：

1. 线圈绕组

组成绕组的线圈是以同样的方法放在每个极上，而这些线圈以串联或并联的方式连接成一个单独回路。通常，它们是缠绕在凸极上的，如图 1-2 所示。但在某些情况下（例如汽轮发电机的磁场绕组），线圈绕组也可以放置在槽中。

2. 多相绕组

这种类型绕组中的各个导体分布在许多槽中，并连接成为几个独立的电路，每相一个电路。导体组形成相带，并在整个极距范围内按顺序依次排列。

3. 换向器绕组

这种绕组中的导体放置在许多槽中，并连续依次连接到换向片上。电流从外电路经过电刷流入和流出绕组，而电刷以一定的压力压在换向器表面上。根据电刷装置的布置情况，可以有一个或几个外电路。

电机的类型取决于在定子和转子上所用这些类型绕组的组合情况。例如，直流电机有一个线圈绕组和一个换向器绕组，同步电机有一个线圈绕组和一个多相绕组，而异步电机有两个多相绕组。前两种类型的绕组既可以放在电机的定子上，也可以放在转子上。但带固定电刷的换向器绕组必须放在转子上。