



清华大学学术专著

---

---

# 交流电机 及其系统的分析

(第二版)

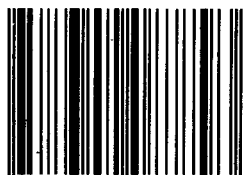
---

高景德 王祥珩 李发海 著

---

清华大学出版社

ISBN 7-302-08779-2



9 787302 087793 >

定价：55.00元(平装)



清华大学学术专著

---

---

# 交流电机 及其系统的分析

(第二版)

---

高景德 王祥珩 李发海 著

---

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是作者在清华大学多年从事交流电机及其系统的教学、科研的基础上,结合近年科技的发展和应编写而成的,主要研究以交流电机为中心的相关系统,着重于分析方法和运行性能。

本书共7章。第1章以凸极电机为研究对象,把交流电机看作具有相对运动的定子和转子组成的电路,从单个线圈出发,讨论其数学模型和参数计算方法。第2、3章和第5章研究并讨论了三相同步电机与异步电机的基本电磁关系及参数、运行性能及分析方法等。第4章研究了自控式同步电动机的数学模型、控制方法及矢量控制等。第6章研究了鼠笼式异步电动机磁场定向矢量控制、转矩直接控制和双馈电机等。第7章讨论了交流电机绕组内部不对称问题。

本书可供电机及其控制领域的研究生作为教材,并供有关专业科技人员与高校教师参考之用。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

交流电机及其系统的分析/高景德,王祥珩,李发海著. —2版. —北京:清华大学出版社,2005.1

ISBN 7-302-08779-2

I. 交… II. ①高… ②王… ③李 III. 交流电机—系统分析 IV. TM34

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第054024号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 王仁康

印 装 者: 三河市春园印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 153×235 印 张: 32.25 字 数: 539 千字

版 次: 2005年1月第2版 2005年1月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-08779-2/TM·50

印 数: 1~2300

定 价: 55.00元(平装)

75.00元(精装)

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或 (010)62795704

## Abstract

This book is written on the basis of the authors' achievements in teaching, research for many years in the field of AC machines and system in Tsinghua University, combining the development and application of technology in recent years. Concentrated on the AC machines the related system is researched, analysis methods and operating performances are stressed in the book.

This book is divided into seven chapters. Chapter 1 takes salient-pole electrical machines as the main object of study. Considering AC machine as a circuit model with stator and rotor moving with each other, starting from a single coil, the mathematic models and the methods of calculating the parameters are discussed. Chapter 2, 3 and 5 describe three-phase synchronous machines and asynchronous machines. The topics are electromagnetic relation, the parameters, operating performance, analysis methods and so on. Chapter 4 covers the mathematic model, control modes and vector control of self-controlled synchronous motors. Chapter 6 deals with field-oriented control of squirrel-cage asynchronous motors, double-fed induction motor systems, direct torque control and so forth. Chapter 7 gives description of inner asymmetric problems in the stator windings of AC machines.

This book is a textbook for the postgraduates in the field of electrical machines and control, and a reference book for the related technicians as well as for the teachers and students of the related specialties in universities or colleges.

# 前 言

随着科学技术的发展,交流电机与电力电子及其控制装置组成的调速传动系统、交流电机与电力传输线组成的电能系统、交流电机与励磁控制装置组成的电机系统等性能分析越来越受到关注。本书就是以交流电机为主体阐明交流电机及其系统分析的专著,着重于分析方法和运行性能的研究。

本书第一版1995年荣获第七届全国优秀科技图书一等奖,面世十年来,交流电机及其系统的研究方面又出现了不少新成果。本书在第一版的基础上增加了一些新内容,主要是清华大学电机教研组十年来在电机及其系统方面的研究成果,涉及电机驱动控制、电机故障分析、特殊电机等不同领域。

本书总体结构与第一版基本相同,仍分为7章。其中第1章至第3章、第5章、第7章由王祥珩修改补充,第4章(4-1~4-6节)和第6章由李发海和孙旭东修改补充。第二版新写的部分中,王善铭撰写3-7节,王祥珩撰写4-7节和7-2节及7-3节,刘丛伟撰写6-3节,孙旭东撰写6-5节。孙宇光也为本书的成稿做了具体工作。由于篇幅的限制,本书删去了第一版中一些目前人们关注较少的内容,或已为本版中新写的部分所覆盖的那些内容。删去的部分有第一版的4-5节、5-4节、6-1节、6-2节、6-6节、6-7节和7-2~7-5节。

本书第一版面世时,高景德先生曾说过,几年后电机及其系统的研究又会有新发展新成果,此书要重新修订,出第二版。此话我们一直铭记在心。今天我们终于交稿成书,可以向先生告慰了。先生作为我国电机及电力系统暂态理论的奠基人,一直对该领域的学术发展十分关心。谨以本书作为对先生最好的纪念。

虽然我们力求在书中反映交流电机及其系统研究的最新成果,但由于水平的限制,书中缺点和疏漏在所难免,我们衷心欢迎读者的批评指正。

作 者

2004年3月

## Preface

With the development of science and technology more attentions have been concentrated on the performance analysis of the following systems: variable speed drive system of AC machines with power electronics and control devices, power energy system composed of AC machines and power lines, electric machine system consisting of AC machines and excitation control devices. This book is a monograph on not only the AC machines but also the systems related to the machines, besides analysis methods and operating performances are stressed in the book.

The first edition of the book was awarded the First Prize of National Excellent Science and Technology Book in 1995. Since the book was published, some progress has been made with the field of AC machines and their systems in the past ten years. Based on the first edition, some new contents are supplied in the second edition of the book which are new achievements developed by Electric Machine Group of Tsinghua University in the fields of electric drive and control, electric machine fault analysis, special machines and so on.

The second edition includes seven chapters as the first edition. Professor Wang Xiangheng supplied and reviewed Chapter 1~3, Chapter 5, Chapter 7; Chapter 4 (4-1~4-6 section) and Chapter 6 were supplied and reviewed by Professor Li Fahai and Dr. Sun Xudong. The new parts in the second edition of the book are: 3-7 by Dr. Wang Shanming, 4-7, 7-2, 7-3 by Professor Wang Xiangheng, 6-3 by Dr. Liu Congwei and 6-5 by Dr. Sun Xudong. Dr. Sun Yuguang made her contribution to the second edition.

Due to the limited space in the second edition of the book, some contents of the first edition were deleted as follows: 4-5, 5-4, 6-1, 6-2,

6-6, 6-7 and 7-2 to 7-5. Some of the deleted parts either are paid less attention now by people, or have been included already in the new parts of the second edition.

The second edition is in commemoration of Professor Gao Jingde, an Academician of Academy of Science of China, the former president of Tsinghua University, who is the founder of the transient theory of electric machine and power system in China.

It is very difficult to avoid defects and careless omission in the second edition owing to the finite acquirement of the authors, although we have made our efforts. We also wish to express our gratitude to the readers who made suggestions or criticisms. You are cordially welcomed to do the same for the second edition.

authors

March 2004



# 第一版前言

交流电机单机容量的增大,应用领域的日益广泛,再加上电力电子技术、计算机技术、微电子技术及控制理论的发展和应用,已使交流电机及其系统的运行条件更为复杂,自动化程度日益提高,运行要求更为严格。新的研究课题不断提出,新的研究成果不断涌现,要求有能反映这种新需要及新成果的交流电机及其系统的专著。

根据科学技术发展的趋势和我国电机工业技术进步的需要,近年,清华大学电机工程与应用电子技术系电机教研组对交流电机及其系统的理论及分析方法开展了研究,并取得了一些新的研究成果。现在这个教研组的工作领域已由“电机”拓宽为“电机及其控制”,要求有能适应这一新情况的教材及专著。

针对上述两方面的需要,我们撰写了《交流电机及其系统的分析》。本书第一次系统地论述了以单个线圈元件为基础的多回路理论,这种方法可按照所研究的电机回路的联接情况,组成相应的回路,不仅可以分析过去难以分析的电机绕组内部不对称问题,而且可以方便地分析以电机为核心的某些系统的运行问题。

这本书是在我们教研组过去已写的书籍和近年科学研究成果的基础上编写而成的,是许多同志工作成果的积累和概括。本书第一章至第三章、第五章及第七章由王祥珩同志撰写,第四章及第六章由李发海同志撰写,全书由高景德同志统一规划,修改补充。我们教研组的张麟征、杨秉寿、郑逢时、朱东起、周明宝、姜建国、黄立培、邱阿瑞、李永东等同志和曾作为或正作为博士生、硕士生的张龙照、曹立字、徐松、孙卫宁、焦书立、李崇坚、李耀华、胡军、徐砚星等同志先后都为本书做出了贡献。

在编写本书的过程中,我们参阅了不少已有的书籍和论文,利用了不少我们教研组过去撰写的书籍和论文,其中主要的已经列入了本书的参考文献,以便读者了解本书内容的主要来源和进一步查阅某些感兴趣的问题,同时也表示对这些书籍及论文的作者的感谢。

最后应该说明,本书试图探索的撰写体系是否合适,尚需经过实践的考验和进一步的完善。书中还难免存在其他的缺点和错误,我们衷心欢迎读者给予批评指正。请将宝贵意见寄(邮编 100084)北京清华大学电机工程与应用电子技术系。

作 者

1992 年 3 月

# Preface to the First Edition

With the increase of single unit capacity and application scopes of AC machines, as well as the development and application of power electronics, computer, micro-electronic technology and control theory, the operating conditions of AC machines and systems become more complicated, their automation level higher, and their operation demands stricter. Therefore new projects and new research results are presented one by one, a monograph on AC machines and systems is needed urgently to reflect the new demand and new development.

Based on the development trend of science and technology and the need for industry technology progress in our country, the electric machine group of the Dept. of Electrical Engineering of Tsinghua University investigated the theory and analysis method of AC machines and their systems in recent years, and has obtained some new results. At present the research fields of the group have been spread to electric machines and control instead of electric machines, hence a book is needed to suit such a new stage.

This book “Analysis of AC Machines and Their Systems” is written for the above two needs. Based on a single coil, the Multi-Loop Theory is totally illustrated in the book for the first time. According to the connection of electric machine windings, not only the inner asymmetric states of electric machine windings (which are very difficult to be researched before) can be analyzed, but also the states of some systems with electric machines can be investigated easily.

This book is compiled on the basis of the published books and papers written by our group. Prof. Wang Xiangheng wrote Chapter 1 to Chapter 3, Chapter 5 and Chapter 7, Prof. Li Fahai wrote Chapter 4 and Chapter

6. All the book was supplied and reviewed by Prof. Gao Jingde. The following persons have made their contributions to this book: Prof. Zhang Linzheng, Prof. Yang Binshou, Prof. Zhen Fengshi, Prof. Zhu Dongqi, Prof. Zhou Mingbao, Prof. Jiang Jianguo, Prof. Huang Lipai, Prof. Qiu Arui, Prof. Li Yongdong and Dr. Zhang Longzhao, Dr. Cao Liyu, Dr. Xu Song, Dr. Jiao Shuli, Dr. Li Chongjian, Dr. Li Yaohua, Dr. Hu Jun, Master Sun Weining, Master Xu Yanxing and so on.

In the process of compiling this book, some books and papers were referred to, and some books and papers written by our group in the past were used. Main of them has been listed in the references in order to help the readers know the major origins and consult some interested problems more deeply. We are grateful to the authors of these books and papers.

Finally it is necessary to verify if the system or clue adopted in writing this book is proper through practice, as well as to further consummate the book. Other defects and errors are difficult to be avoided in the book. Please send your comments and suggestions on the book to: Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code 100084.

authors

March 1992

# 绪 论

**交流电机是电能生产及应用的基本装备。**工农业生产和人民生活中普遍应用的电能,几乎全部是通过交流发电机生产的,而生产出的电能则多半是通过交流电动机加以利用的。现代交流电机的单机容量已经大大增加,应用领域日益扩大,与其组成的系统的自动化程度日益提高,运行条件更加复杂化。在把我国建成现代农业、现代工业、现代国防和现代科学技术的伟大的社会主义强国的过程中,不仅对交流电机的需要量增加,对交流电机的品种的需求日益繁多,而且对其性能和与其组成的系统的要求也不断提高。因此,了解和掌握交流电机及其系统的运行性能和分析方法,对电工科技工作者是十分重要的。

**交流电机及其系统是比较成熟而又迅速发展的科学技术。**交流电机的出现和发展已有一百多年的历史,已经研究制造了型式多样、用途各异的多种交流电机。在电机的设计、制造及运行过程中,经过不断的研究和完善,可以说,人们对于交流电机的结构原理、制造技术和运行性能的了解已经相当深刻了。但由于技术发展和研究条件的限制,过去人们的注意力主要集中在电机的正常运行性能、外部故障状态以及联网经济安全运行等问题上。这是合乎发展规律的,因为这些问题确实是在实际工作中经常遇到的。

三十多年来,电力电子技术的广泛应用、直流输电技术的进步、交直流混合输电系统的联合运行、大容量发电机的制造和应用电机的各种新要求,再加上现代控制理论、微电子技术及计算机、电力电子技术的快速发展,相互促进,相辅相成,使交流电机及其系统的理论和运行性能又有了不少新的发展和提高。例如电机绕组内部不对称问题的分析,电机与电力电子学、微电子学及计算机技术组成的调节控制系统的研究,电磁谐波分量的影响分析和抑制措施等,都是人们关注的新问题。

交流电机在运行过程中,由于制造的缺陷或操作使用不当等原因,可能使电机绕组发生故障而造成不必要的损失。大型水轮发电机定子绕组往往

采用多支路结构,在运行中,如果发生匝间或相间短路以及绕组断裂等内部故障,数值很大的短路电流就可能使其产生严重的机械损伤或因局部过热而烧毁绕组或铁心;故障发生时的负序磁场还可能损伤转子。汽轮发电机和异步电机的定子绕组在运行中也可能发生严重的内部故障。在交流电机转子方面,还可能发生导条开焊、断裂或短路等故障。这就要求研究分析电机发生内部故障时的各状态量,以便了解这种故障的危害性,以改进设计制造,并提出相应的继电保护装置。

在直流输电系统中,发电机与整流器件组成一种与交流输电迥异的特殊系统。从电机方面看,它经常处在不对称运行状态,整流元件的非线性作用使这个系统中出现了严重的谐波,提出了不少值得研究的特殊问题。得到普遍应用的交流励磁系统以及在发电机定子内圆加装励磁线棒并经整流器供给主机励磁的系统等,均有类似的问题。

交流电动机的调速和控制技术在与计算机、微电子学及电力电子技术结合后,突飞猛进地发展,过去不易量测或控制的电磁过程,现在经过在线量测、计算分析和控制,可以实现多种要求、多种原理和技术方案的调节控制。交直交变频、交交变频、脉冲宽度调制、多电平等技术为交流电动机的调速和控制提供了许多新的可能。自控式同步电动机及矢量控制的异步电动机的研究和应用,已经取得了不少新成就,特别是在交流电动机的调速性能方面取得的进展是十分令人瞩目的。

随着电子计算机的发展和数值计算方法的应用,过去很多难以计算的电机电磁场问题得到了求解的可能,大大提高了电机设计、运行性能分析的能力和参数计算的准确度。在异步电机变极调速、起动原理及方法、电容与电机绕组的组合应用方面以及方波电源供电的特殊电机、蓄能电机、特种电机的研制等方面所取得的成就,也是十分明显的。

交流电机及其系统的深入分析要求提出新的理论和方法。我们知道,就交流电机的电磁关系而言,可以看成是一些相互耦合的线圈的集合,并可按一般的电路法则进行研究。但由于转子旋转的关系,这些电路之间存在着相对运动的特点。交流电机的定子绕组一般均采用在时间及空间上互差 $120^\circ$ 的三相对称分布绕组,这样设计的绕组一般均能使三相对称电流产生的气隙磁场达到基本为正弦分布的要求。这样制造的交流电机的技术经济指标一般均较高,它的用料、加工等制造费用,损耗、效率、转矩、振动等性能指标以及运行中的经济性及可靠性等均属优良之列。因此,过去在研究分析这种电机时,一般均假定基波磁动势产生基波气隙磁场,少量的气隙谐波

磁场归入漏磁场加以考虑。在分析其运行性能时,所用参数也多以反映其气隙磁场总效应的数值为准,诸如同步电机的电枢反应电抗  $x_{ad}, x_{aq}$ , 异步电机的激磁电抗  $x_m$  等。相应地,其他参数,如同步电机的  $x_d, x_q, x'_d, x'_q, x''_d, x''_q$  也都是些反映其电磁总效应的数值。应用这些参数建立的数学模型及分析的结果一般也能满足实际工作的要求。因此多年来教科书和参考书均以相绕组为基础,并以多相绕组的总体效应分析电机的理论和方法为基本内容。

如前所述,随着科学技术的进步及发展,电机绕组内部的不对称,电机和电力电子技术组合而成的新系统以及某些新的特殊结构的电机的出现,使过去常用的主要以单机为分析对象和以对称的相绕组为基础的理论和方法已不能满足研究某些问题的要求,而需将电机及与其相联的外部装置作为一个系统来考虑电磁谐波分量等的影响。正是根据这一考虑,本书拟以单个线圈元件为基础来论述电机的基本电磁关系,并建立相应的关系式。有了这些关系式后,利用它们不仅可以研究已有方法能够研究的问题,而且可以研究上述提到的新出现的问题。因为电机的这些基本电磁关系式是建立在单个线圈的基础上的,可以根据所研究问题的需要,组成相应回路的基本电磁关系式,包括过去常用的以相绕组为基础的基本电磁关系式。由于在这些基本关系式中计入了电机的电磁谐波,因此它既可研究考虑这些谐波影响的问题,也可研究忽略这些谐波的问题。

由于这种方法所用的电机参数是绕组的自感及互感系数,因此需要时也很容易根据这些参数求出前述的反映电机绕组总效应的参数或相应的基本关系式。

这种由单个线圈元件出发,按照所研究的电机回路的联接情况和需要组合成相应的回路方程进行研究的方法,我们称之为电机的多回路分析法,我们将以此为主线来撰写本书。

**本书的主要内容。**在本书的第1章中,我们将以具有代表性的凸极电机为研究对象,从单个线圈出发,讨论交流电机的基本电磁关系,单个线圈的电感系数,以及将它们组成回路方程的方法等。这是我们了解交流电机原理和分析其运行状态的基础。

本书的第2、第3、第5章中,将应用第1章的结果,研究和讨论三相同步电机及异步电机的电磁关系及参数,以及这种电机及其系统的某些运行性能。在本书的第4、第6章内,将研究和讨论同步电机及异步电机与电力

电子器件组成的运行系统,诸如自控式同步电动机,矢量控制的异步电机调速系统的分析方法等。这 5 章的内容既是第 1 章所述理论和方法在这两种电机中的深化和具体应用,也是这种理论和方法与惯用的理论和方法的沟通。在本书第 7 章中,将研究和讨论交流电机绕组内部不对称问题。对于这类问题,这种以单个线圈元件为基础的理论和方法,在分析中将具有很多的方便性。



# 目 录

绪论 .....	XIX
<b>第 1 章 交流电机的电路分析——多回路模型和参数</b> .....	1
1-1 交流电机回路的电磁关系 .....	1
1-2 电机的气隙磁导系数 .....	5
1-3 单个线圈产生的气隙磁场及其电感系数 .....	7
1-4 电机定子回路的电感系数 .....	15
1-5 电机转子回路的电感系数 .....	18
1-6 电机定、转子回路间的电感系数 .....	27
1-7 饱和对参数的影响 .....	28
1-8 漏磁场引起的电感系数 .....	30
1-9 交流电机电磁转矩和转子运动方程 .....	33
1-10 单相异步电机的参数和性能分析 .....	36
<b>第 2 章 同步电机的电磁关系及参数</b> .....	48
2-1 同步电机的基本电磁关系 .....	49
2-2 同步电机在 $d, q, 0$ 坐标系统的基本关系式 .....	65
2-3 同步电机的标么值系统 .....	75
2-4 同步电机基本方程的标么值形式、运算电抗和电磁转矩 .....	80
2-5 同步电机突然三相短路和瞬变参数 .....	90
2-6 同步电机的稳态小值振荡和转矩系数 .....	111
<b>第 3 章 同步电机及其系统的某些运行状态的分析</b> .....	130
3-1 同步电机坐标系统的转换 .....	130
3-2 同步电机的稳态两相短路及负序电抗 .....	143
3-3 同步电机的突然两相短路 .....	153