

机电动力系统分析

辜承林 编著

华中理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机电动力系统分析/辜承林编著

武汉: 华中理工大学出版社, 1998年8月

ISBN 7-5609-1791-7

I. 机…

II. 辜…

III. 机电设计-系统分析-机电控制-高等教材

IV. TM301.4

·研究生用书·

机电动力系统分析

辜承林 编著

责任编辑: 黄以铭

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编: 430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.75 插页: 2 字数: 260 000

1998年8月第1版 1998年8月第1次印刷

印数: 1-1 500

ISBN 7-5609-1791-7/TM·73

定价: 14.00 元

(本书若有印装质量问题, 请向出版社发行部调换)

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生通过学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自1978年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科技

术知识更新很快的形势；学术专著则应充分反映作者的科研硕果和学术水平，阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上，应条理清楚，论证严谨，文字简炼，符合人们的认识规律。总之，要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些，但由于研究生的培养工作为时尚短，水平和经验都不够，其中缺点、错误在所难免，尚望校内外专家学者及读者不吝指教，我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陈 珽 黄树槐

1989. 11.

目 录

第一章 机电动力系统分析基础

1.1 电磁耦合系统	(1)
1.1.1 线性分析模型	(3)
1.1.2 非线性分析模型	(7)
1.2 机电耦合系统	(12)
1.2.1 机电耦合系统的构成及示例	(12)
1.2.2 机电耦合系统的能量平衡	(14)
1.2.3 机电耦合系统中的能量分布	(16)
1.2.4 机电耦合系统中的电磁力和电磁转矩	(18)
1.3 旋转电机的电磁转矩和转子运动方程	(24)
1.3.1 旋转电机电磁转矩的一般形式	(24)
1.3.2 均匀气隙电机产生恒定电磁转矩的条件	(25)
1.3.3 非均匀气隙电机产生恒定电磁转矩的条件	(29)
1.3.4 有槽电机电磁转矩的构成	(32)
1.3.5 转子运动方程	(36)
1.3.6 转动惯量和摩擦系数的确定	(37)
1.4 拉格朗日-麦克斯韦方程	(41)
1.4.1 哈密顿原理	(41)
1.4.2 机电动力系统的拉格朗日-麦克斯韦方程	(43)
1.4.3 拉格朗日-麦克斯韦方程的应用	(45)
1.5 机电动力系统运动方程的解法	(51)

1.5.1 机电动力系统的状态方程	(51)
1.5.2 非线性常微分方程初值问题的龙格-库塔算法	(57)
1.5.3 机电动力系统初始条件的确定	(58)
1.5.4 数值仿真的稳定性	(60)
问题与思考	(63)

第二章 直流电机及系统

2.1 直流电机的数学分析模型	(67)
2.1.1 他励直流电机	(68)
2.1.2 并励直流电机	(70)
2.1.3 串励直流电机	(71)
2.1.4 复励直流电机	(72)
2.2 并励直流电机的状态方程、方块图、标幺值 和传递函数	(75)
2.2.1 状态方程	(75)
2.2.2 方块图	(76)
2.2.3 标幺值	(77)
2.2.4 传递函数	(80)
2.3 恒压源供电的并励直流电动机的动态行为	(81)
2.3.1 启动过程分析	(81)
2.3.2 转矩阶跃响应	(87)
2.4 整流电源供电的并励直流电动机	(90)
2.4.1 单相全控整流器-并励直流电动机系统	(90)
2.4.2 三相全控整流器-并励直流电动机系统	(98)
2.5 晶闸管直流传动系统分析	(103)
2.5.1 晶闸管直流电机闭环调速系统	(104)

2.5.2 晶闸管直流调速系统的一般化分析模型	(105)
2.5.3 晶闸管直流传动系统的线性化分析模型	(107)
2.5.4 晶闸管直流调速系统的数值仿真分析	(109)
问题与思考	(111)

第三章 参照系理论

3.1 引言	(112)
3.2 变量在三相静止参照系 a-b-c 和任意参照系 d-q-n 之间的变换关系	(114)
3.2.1 满秩线性变换	(114)
3.2.2 a-b-c 参照系和 d-q-n 参照系之间的变量代换关系	(115)
3.2.3 变换矩阵的物理意义	(117)
3.3 任意参照系中的电路元件方程	(120)
3.3.1 电阻元件	(120)
3.3.2 电感元件	(122)
3.3.3 电容元件	(131)
3.4 常用参照系及不同参照系之间的转换	(133)
3.4.1 几个常用的参照系	(133)
3.4.2 不同参照系之间的转换	(133)
3.5 变量在不同参照系中的波形	(136)
问题与思考	(141)

第四章 异步电机及系统

4.1 a-b-c 参照系中的分析模型	(144)
4.1.1 理想化异步电机的假设	(144)
4.1.2 绕组电感计算	(145)

4.1.3 分析模型	(154)
4.2 d-q-n 参照系中的分析模型	(159)
4.2.1 定、转子变量的变换方程	(159)
4.2.2 d-q-n 参照系中的磁链方程和电感系数	(160)
4.2.3 d-q-n 参照系中的电压方程	(162)
4.2.4 d-q-n 参照系中的电磁转矩和转子运动方程	(163)
4.2.5 标么值系统	(165)
4.2.6 常用参照系中的标么化状态方程	(167)
4.3 正弦电压源供电的异步电机的动态行为	(171)
4.3.1 端电压条件和初始条件	(171)
4.3.2 理想空载启动过程	(175)
4.3.3 负载转矩的突加和突减过程	(186)
4.3.4 端部三相突然短路过程	(188)
4.4 鼠笼式异步电机矢量控制变频调速系统	(191)
4.4.1 交流电机矢量控制原理	(191)
4.4.2 鼠笼式异步电机的矢量控制模型	(194)
4.4.3 非正弦电源转换及 PWM 波形的谐波消除技术	(200)
4.4.4 数值仿真结果分析	(210)
4.5 绕线式异步电机矢量控制变速恒频发电系统	(218)
4.5.1 序言	(218)
4.5.2 绕线式异步电机矢量控制变速恒频发电系统	(219)
4.5.3 稳态特性分析	(224)
4.5.4 动态特性仿真	(228)
问题与思考	(235)

第五章 同步电机及系统

5.1 a-b-c 参照系中的分析模型	(237)
---------------------	-------

5.1.1	理想化同步电机的假设	(237)
5.1.2	绕组电感计算	(238)
5.1.3	分析模型	(247)
5.2	d-q-n 参照系中的分析模型	(255)
5.2.1	定子变量的变换方程	(255)
5.2.2	d-q-0 参照系中的磁链方程和电感系数	(256)
5.2.3	d-q-0 参照系中的电压方程	(258)
5.2.4	d-q-0 参照系中的电磁转矩和转子运动方程	(259)
5.2.5	标么值系统	(262)
5.3	同步发电机的动态行为	(267)
5.3.1	稳态运行条件	(267)
5.3.2	动态行为仿真的初始条件和端口约束条件	(270)
5.3.3	动态行为仿真分析	(275)
5.4	同步电动机的分析模型	(287)
5.4.1	磁链方程	(288)
5.4.2	电压方程	(289)
5.4.3	电磁转矩和转子运动方程	(291)
5.4.4	数值仿真模型	(292)
5.5	轴向叠片转子同步电动机矢量控制调速系统	(293)
5.5.1	概述	(293)
5.5.2	分析模型	(295)
5.5.3	矢量控制模型及系统	(297)
5.5.4	系统仿真	(301)
	问题与思考	(312)
	附录 A 实用三角恒等式	(314)
	附录 B 矩阵求逆和代数方程组求解子程序	(315)

附录 C 通用龙格-库塔算法子程序	(318)
参考文献	(321)

第一章 机电动力系统分析基础

1.1 电磁耦合系统

依据法拉弟电磁感应定律实现机电能量转换的机电动力系统首先是一个电磁耦合系统。虽然它们按运行方式可分为静止型电器和运动型电机两大类，但基本原理和分析方法是统一的。实施交流电量（电压或电流）变换的变压器是静止型电磁耦合系统的典型例子，图 1.1 是一个通过铁心耦合的两线圈变压器的示意图。下面就其基本电磁关系进行分析，并由此得出适合于一般电磁耦合系统的分析方法。

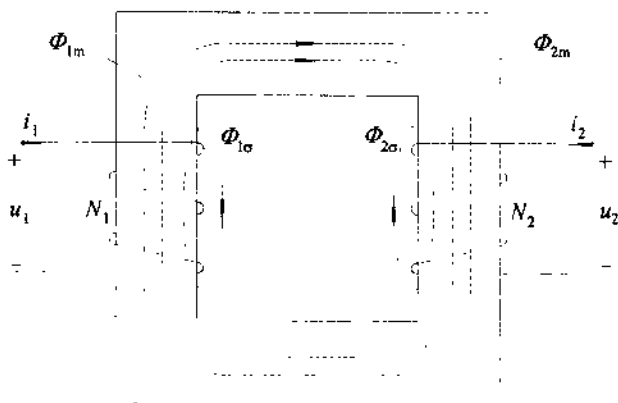


图 1.1 典型两端口静止电磁耦合系统（两线圈变压器）示意图

参照图1.1, 延用电路理论和电机学中惯用的变量符号, 假设正方向遵照电动机惯例, 则与线圈1和线圈2交链的磁通分别为

$$\begin{cases} \Phi_1 = \Phi_{1\sigma} + \Phi_{1m} + \Phi_{2m} \\ \Phi_2 = \Phi_{2\sigma} + \Phi_{2m} + \Phi_{1m} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, 下标 1、2 代表线圈编号; 下标 m 和 σ 表示主磁通和漏磁通; Φ_{1m} 和 Φ_{2m} 分别由 i_1 和 i_2 产生, 但同时与线圈 1、2 交链。

设线圈 1、2 的匝数分别为 N_1 和 N_2 , 即有磁链方程

$$\begin{cases} \psi_1 = N_1 \Phi_1 \\ \psi_2 = N_2 \Phi_2 \end{cases} \quad (1-2)$$

从而电压方程为

$$\begin{cases} u_1 = r_1 i_1 + p \psi_1 \\ u_2 = r_2 i_2 + p \psi_2 \end{cases} \quad (1-3)$$

或记为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

(1-3) 和 (1-4) 式中,

$$p = d / dt \quad (1-5)$$

为微分算子。

(1-3) 或 (1-4) 式即为两线圈变压器这一典型静止电磁耦合系统的通用分析模型。由于构成变压器铁心的铁磁材料(多为硅钢片)一般呈现非线性磁化特性, 因此, 若不附加假设条件, 该方程组将不可能解析求解。这也是电磁耦合系统分析中普遍面临的困难。为解决这一困难, 通常假设磁饱和效应可以忽略, 即将非

线性问题转化为线性或局部线性问题。像传统电机学中所做的那样,通过引进若干电感系数,将电磁耦合系统作为纯电路问题近似求解,由此得出能满足工程需要的解答,必要时,再根据经验对解答进行修正。

应该说,上述处理方法经实践证明是有效的。然而,在计算机技术和数值方法已渗透到所有科学领域并强有力地推动和影响着现代科学技术发展进程的今天,非线性问题的数值求解技术也得到了长足的发展和广泛的应用。可以说,在电磁耦合系统的计算机辅助分析中,充分考虑饱和效应,用高精度数值解替代近似解析解,已不存在任何实质性困难。因而,人们在对系统内部电磁关系、物理过程具有更准确把握的同时,还有可能对系统的行为和特性进行最大程度的干预,并对系统实施整体意义上的最优化设计。事实上,如前言中所述,这也是学习本课程的基本目的。

综上所述,考虑到问题表述的系统性,同时也便于讨论,以下将分别介绍(1-4)式的解析求解(线性分析)模型和非线性数值分析模型。

1.1.1 线性分析模型

不考虑饱和时,铁心材料的磁导率为常数。设各部分磁路的等效磁导为

$$A_x = \mu_x A_x / l_x \quad (x = 1\sigma, 2\sigma, m) \quad (1-6)$$

则由磁路欧姆定律有

$$\begin{cases} \Phi_{1\sigma} = N_1 i_1 A_{1\sigma} \\ \Phi_{1m} = N_1 i_1 A_m \\ \Phi_{2\sigma} = N_2 i_2 A_{2\sigma} \\ \Phi_{2m} = N_2 i_2 A_m \end{cases} \quad (1-7)$$

(1-6) 式中, μ_0 为磁路平均磁导率; A_0 为磁路平均截面积; l_0 为磁路平均长度。

将 (1-7) 式代入 (1-1) 式, 所得算式再代入 (1-2) 式得

$$\begin{cases} \psi_1 = N_1(N_1 i_1 A_{1\sigma} + N_1 i_1 A_m + N_2 i_2 A_m) \\ \quad = N_1^2 A_{1\sigma} i_1 + N_1^2 A_m i_1 + N_1 N_2 A_m i_2 \\ \psi_2 = N_2(N_2 i_2 A_{2\sigma} + N_2 i_2 A_m + N_1 i_1 A_m) \\ \quad = N_2^2 A_{2\sigma} i_2 + N_2^2 A_m i_2 + N_2 N_1 A_m i_1 \end{cases} \quad (1-8)$$

定义线圈 1、2 的漏感系数为

$$L_{k\sigma} = N_k^2 A_{k\sigma} \quad (k=1,2) \quad (1-9)$$

同理, 线圈 1、2 的自感系数定义为

$$L_{km} = N_k^2 A_m \quad (k=1,2) \quad (1-10)$$

由此可得关系式

$$L_{1m} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{2m} = K^2 L_{2m} \quad (K = \frac{N_1}{N_2}) \quad (1-11)$$

(1-11) 式可改写为

$$L_{1m} / K = N_1 N_2 A_m = K L_{2m} \quad (1-12)$$

综上各式, (1-8) 式可改写成

$$\begin{cases} \psi_1 = L_{1\sigma} i_1 + L_{1m} (i_1 + i_2 / K) \\ \psi_2 = L_{2\sigma} i_2 + L_{2m} (K i_1 + i_2) \end{cases} \quad (1-13)$$

(1-13) 式即用线性参数表示的磁链方程。由于式中显含与线圈匝数有关的比例系数 K ($K \neq 1$), 不便于建立等效电路分析模型, 故需作特殊处理。为此, 从物理等效角度出发, 设想用一个匝数为

N_1 的线圈替代线圈 2。因等效前后磁势应保持不变，故要求

$$N_1 i_2' = N_2 i_2$$

亦即

$$i_2' = i_2 / K \quad (1-14)$$

式中， i_2' 为等效线圈中的电流。

此外，从功率不变出发还应有

$$u_2' i_2' = u_2 i_2 \quad (1-15)$$

将 (1-14) 式代入 (1-15) 式，整理后就是

$$u_2' = K u_2 \quad (1-16)$$

式中， u_2' 为等效线圈的端电压。

同理，根据磁通不变原则可得

$$\frac{\psi_2'}{N_1} = \frac{\psi_2}{N_2}$$

即与等效线圈交链的磁链为

$$\psi_2' = K \psi_2 \quad (1-17)$$

至此，将 (1-11)、(1-14) 和 (1-17) 式代入 (1-13) 式后，整理得

$$\begin{cases} \psi_1 = L_{1\sigma} i_1 + L_{1m} (i_1 + i_2') = L_1 i_1 + L_m i_2' \\ \psi_2' = L_{2\sigma}' i_2' + L_{1m} (i_1 + i_2') = L_m i_1 + L_2' i_2' \end{cases} \quad (1-18)$$

式中，

$$L_{2\sigma}' = K^2 L_{2\sigma} \quad (1-19)$$

$$\begin{cases} L_m = L_{1m} \\ L_1 = L_{1\sigma} + L_m \\ L_2' = L_{2\sigma}' + L_m \end{cases} \quad (1-20)$$

最后，将 (1-16) 和 (1-18) 式代入 (1-4) 式后，有

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & L_m \\ L_m & L_2' \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2' \end{bmatrix} \quad (1-21)$$

式中，

$$r_2' = K^2 r_2 \quad (1-22)$$

(1-21) 式就是以电流为状态变量，描述两线圈变压器这一最简静止电磁耦合系统电磁关系的状态方程。不计饱和影响（电感参数恒定）时，该方程组即所谓线性分析模型，可用两端口 T 型等效电路描述（图 1.2），用解析方法求解。可以证明，该模型同样适用于多相对称系统分析，亦可推广到静止型或以匀速相对运动的多端口电磁耦合系统。

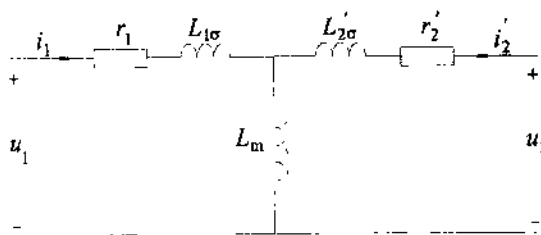


图 1.2 两端口静止电磁耦合系统的 T 型等效电路

上述分析处理方法通称为折算法，在电磁耦合系统分析中广泛应用，是建立电磁耦合系统等效电路分析模型的基本手段。其

实质就是在多端口系统中,选定一个统一的参照系,将各端口参数和物理量按物理等效原则变换到该参照系中,以简化分析。通常,被折算后的参数和物理量均以右上角加撇号'表示。本节也采用了这一习惯。然而,为表示方便,本书以后有关章节中将省略'号,无特别说明即认为需要折算的量已经被折算。

1.1.2 非线性分析模型

普通电磁耦合系统在正常运行情况下,磁路都存在一定程度的饱和,即工作点在如图1.3所示的典型铁磁材料(硅钢片) B - H 磁化曲线的饱和段,为提高材料利用率,作为基本设计准则,通常设计在曲线的膝点附近。由于 $H \propto i_m$, $B \propto \Phi \propto \Psi$,因此,磁链 Ψ 与(激磁)电流 i_m 之间的关系为非线性, L_m 不是常数,其结果要么是无法从(1-4)式导出(1-21)式,要么是表述成(1-21)式后,由于参数非线性而无法解析求解。总之,实际分析必须借助计算机以数值方式进行,且分析模型也会因方法不同而异。

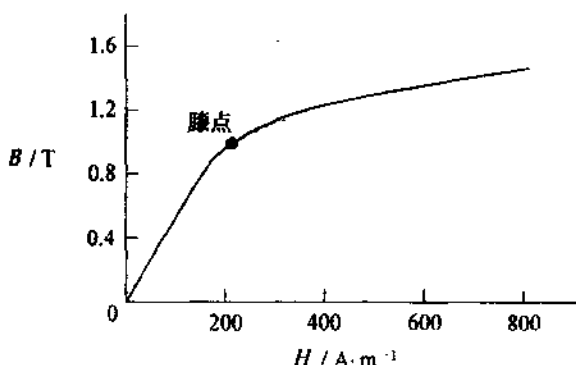


图1.3 硅钢片的磁化特性(B - H 曲线)