



普通高等教育电机与电器创新型规划教材

# 交流电机 动态分析

第2版

汤蕴璆 王成元 编著

JIAOLIU DIANJI DONGTAI FENXI



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电机与电器创新型规划教材  
研究生教学用书

# 交流电机动态分析

第2版

汤蕴璆 王成元 编著



机械工业出版社

本书共7章。第1章是预备知识,主要说明交流电机动态分析的特点、步骤和基本方法,包括坐标变换、等效电路、运动方程和状态方程的建立及其解法。第2~6章阐明在常用的各种坐标系中,感应电机和同步电机的运动方程、运算电抗和状态方程的导出,许多经典电磁瞬态问题的解法和一些典型动态问题的求解。第7章介绍交流电动机的调速。书末有4个附录,对某些问题进行了进一步推导。

本书是高等学校电气工程学科的研究生教材,也可供高等学校教师以及电机设计和运行方面的工程技术人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交流电机动态分析/汤蕴璆、王成元编著. -2版. -北京:机械工业出版社, 2015.2  
普通高等教育电机与电器创新型规划教材  
ISBN 978-7-111-48260-4

I. ①交… II. ①汤…②王… III. ①交流电机-动态分析-高等学校-教材 IV. ①TM340.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第236862号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 王小东

版式设计:霍永明 责任校对:陈越

封面设计:张静 责任印制:康朝琦

北京振兴源印务有限公司印刷

2015年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·392千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48260-4

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

## 第 2 版前言

本书自第 1 版出版以来，已经过了 10 年。在此期间，三相感应电动机在调速方面的研究和实践，有了很大的进展，特别是在矢量控制调速方面；在同步发电机方面，由于容量日益增大，各种参数的计算精确化方面也有一定进展。为了反映这些进展，编者将此书进行了修订。

第 2 版的特点是：

1. 专设交流电动机的调速一章（第 7 章），以反映近年来这方面的进展。

2. 参考文献方面，增补了近 10 年来在交流电机动态分析方面，发表在电工技术学报和 IEEE Tran. 上的有关论文。

3. 删去一些过时的内容。

本书的第 1~6 章由哈尔滨理工大学汤蕴璆教授编写，第 7 章由沈阳工业大学王成元教授编写，全书由汤蕴璆统稿。在文献检索方面，得到哈尔滨理工大学图书馆和黑龙江省图书馆有关同志的大力帮助，特此表示感谢。

作者  
2014 年 11 月

## 第1版前言

“交流电机瞬态分析”是电机及其控制专业研究生的一门学位课程，但是到目前为止，尚没有一本合适的教材。在同步电机方面，国内有几本专著，但是篇幅一般较大，内容稍偏，并且缺少动态分析的内容；感应电机方面可作为教材的著作更少。国外方面1985年以后有几本较好的专著，但篇幅一般较大；有的偏重于用模拟计算机求解，有的着重用空间矢量法进行分析，对同步电机中许多经典的瞬态问题较少涉及。有鉴于此，编写一本适合于研究生使用、篇幅适中的教材是十分必要的。

本书的特点是：①理论与实际并重。一方面对交流电机瞬态和动态分析的基本理论，如坐标变换，常用坐标系中交流电机的运动方程，状态方程及其解法，运算电抗和等效电路等内容，给予较大的重视；另一方面对交流电机运行中发生的许多实际问题，如突然短路问题，动态运行问题等，都有较为详细的分析和阐述；最后在附录中列出感应电机和同步电机动态计算的两个源程序，使读者一旦掌握了基本理论，即可较快地进行各种实际动态问题的计算。②同步电机和感应电机并重。由于同步电机和感应电机的理论和分析方法有许多内在的联系，加上在电力系统和工业企业中这两种电机应用十分广泛，因此在内容选择上，作者采用同步电机和感应电机两者并重的方针。③瞬态问题和动态问题兼顾。交流电机的瞬态研究已有70多年的历史，许多问题及其解答已成为经典知识，读者应当了解或掌握，以便在解决同类问题时有所遵循和借鉴。至于动态问题，则是近20年来国际上的研究方向和重点。由于动态问题的运动方程是非线性微分方程组，过去无法求解，现在可以用计算机和数值法求得具体问题的数值解；另外，某些问题过去在一系列假定下得到了近似的解析解，现在需要重新审视、检查其结果；总之这方面还有许多工作要做。作者希望，本书的出版能为此起到一定的推动作用。④篇幅适中。本书正文30多万字，主要内容可作为研究生教材，部分内容则可作为深入进行科研工作的引导。

本书的前6章和附录A、B、C、D由汤蕴璆编写，第7章由张奕黄和范瑜编写，附录E由沈阳工业大学谢德馨教授编制，附录F由沙洲工学院汤晓燕讲师编制。全书承哈尔滨大电机研究所徐怡高级工程师审稿，并提出许多宝贵意见，对此作者表示深切的谢意。本书的出版得到北京交通大学电气工程学院领导的大力支持，作者亦向他们表示感谢。

作者  
于北京交通大学  
2004年4月

## 主要符号表

$A$	状态方程中的系统矩阵	$i_a, i_b, i_c$	感应电动机转子 a 相、b 相和 c 相的电流相量
$a$	$120^\circ$ 相量算子	$i_+, i_-, i_0$	对称分量变换中的正序、负序和零序电流相量
$\alpha$	$120^\circ$ 矢量算子	$i_d, i_q$	同步电机定子的直轴和交轴电流相量
$B$	状态方程中的控制矩阵	$i_{d(M)}, i_{q(M)}$	采用电动机惯例时,同步电机定子的直轴和交轴电流相量
$C$	新、旧坐标系之间电流(电压)的变换矩阵	$i_{s1}$	感应电动机的定子基波电流相量
$C_s$	定子电流的变换矩阵	$I_f(t)$	计及电阻时,线间或单相短路时励磁电流瞬态自由分量的修正项
$C_r$	转子电流的变换矩阵	$I_D(t)$	计及电阻时,线间或单相短路时直轴阻尼绕组电流的修正项
$E_{0m}$	同步电机定子激磁电动势的幅值	$I_s$	$i_s$ 的拉氏变换
$e_1, e_2, e_3$	三回路电路中回路的电动势	$I_r'$	$i_r'$ 的拉氏变换
$e_d, e_q$	在 $dq0$ 坐标系中电动势的直轴和交轴分量	$i_A, i_B, i_C$	同步电机(感应电机)定子 A 相、B 相和 C 相电流的瞬时值
$e_f, e_b$	在 $f\beta 0$ 坐标系中电动势的前进和后退分量	$i_a, i_b, i_c$	感应电动机转子 a 相、b 相和 c 相电流的瞬时值
$F(t)$	计及电阻影响时,线间或单相突然短路时定子短路电流中基波和奇次谐波项的修正因数	$i_d, i_e, i_f$	双笼型电动机下笼等效三相绕组电流的瞬时值
$F(s)$	$f(t)$ 的拉氏变换	$i_\alpha, i_\beta, i_0$	$\alpha\beta 0$ 坐标系中的 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和零序电流
$F$	旋转电压系数矩阵	$i_d, i_q$	$dq0$ 坐标系中的直轴和交轴电流
$F'$	坐标变换后,在新坐标系中的旋转电压系数矩阵	$i_1, i_2$	$120$ 坐标系中的瞬时值正序和负序电流
$G(t)$	计及电阻影响时,线间或单相突然短路时,定子短路电流中直流和偶次谐波项的修正因数	$i_f$	同步电机的励磁电流; $f\beta 0$ 坐标系中电流的前进分量
$G_f(p)$	用微分算子 $p$ 表达时励磁绕组的传递函数	$i_b$	同步电机定子电流的基值; $f\beta 0$ 坐标系中电流的后退分量
$G_f(s)$	励磁绕组的传递函数	$i_D$	直轴阻尼绕组电流
$G_D(s)$	直轴阻尼绕组的传递函数	$i_Q$	交轴阻尼绕组电流
$G'$	旋转电感矩阵(转矩矩阵)	$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s0}$	在定子 $\alpha\beta 0$ 坐标系中定子的 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和零序电流
$H$	机组的惯性常数	$i_{r\alpha}, i_{r\beta}, i_{r0}$	在转子 $\alpha\beta 0$ 坐标系中转子的 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和零序电流
$h$	时间步长	$i_{rd}, i_{rq}$	在 $dq0$ 坐标系中感应电机转子的直轴和交轴电流
$I_d, I_q$	同步电机直轴和交轴电流 $i_d, i_q$ 的拉氏变换	$i_{d(M)}, i_{q(M)}$	采用电动机惯例时,同步电机定子的直
$I_f$	同步电机励磁电流 $i_f$ 的拉氏变换		
$I_D$	同步电机直轴阻尼绕组电流 $i_D$ 的拉氏变换		
$I_A, I_B, I_C$	定子 A 相、B 相和 C 相的电流相量		

	轴和交轴电流	$L_r$	转子绕组的自感矩阵
$i_{fb}$	励磁电流的基值	$L'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的电感矩阵
$i_{Db}, i_{Qb}$	直轴和交轴阻尼绕组电流的基值	$L'_s$	坐标变换后,在新的坐标系中定子的自感矩阵
$i_{sM}, i_{sT}$	在 $MT$ 坐标系中,感应电机定子电流的 $M$ 轴和 $T$ 轴分量	$L'_r$	坐标变换后,在新的坐标系中转子的自感矩阵
$i_{rM}, i_{rT}$	在 $MT$ 坐标系中,感应电机转子电流的 $M$ 轴和 $T$ 轴分量	$L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}$	同步电机定子 A 相、B 相和 C 相绕组的自感
$i$	整个电机的电流矩阵;电流的空间矢量	$L_{d0}$	同步电机定子每相自感中的恒定分量
$i'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的电流矩阵	$L_{s2}$	同步电机定子每相自感中的二次谐波幅值
$i_s$	定子电流矩阵;定子电流的空间矢量	$L_{ff}$	励磁绕组的自感
$i_r$	转子电流矩阵;转子电流的空间矢量	$L_{DD}$	直轴阻尼绕组的自感
$i'_s$	坐标变换后,在新的坐标系中定子的电流矩阵;在转子坐标系中定子电流的空间矢量	$L_{QQ}$	交轴阻尼绕组的自感
$i'_r$	坐标变换后,在新的坐标系中转子的电流矩阵;在定子坐标系中转子电流的空间矢量	$L_{fb}$	励磁绕组电感的基值
$i_{sk}, i_{rk}$	在任意转速的通用坐标系中,定子电流和转子电流的空间矢量	$L_{Db}$	直轴阻尼绕组电感的基值
$J$	机组的转动惯量	$L_{ss}$	感应电机定子绕组每相的自感
$J_r$	电机的转动惯量	$L_{rr}$	感应电机转子三相绕组每相的自感
$K$	克利斯多夫电压系数矩阵	$L_{tt}$	双笼型电动机下笼等效三相绕组每相的自感
$k$	定、转子绕组的变比	$L'_{rr}$	归算到定子边时 $L_{rr}$ 的归算值
$k_D$	阻尼转矩系数	$L_{\alpha\alpha}, L_{\beta\beta}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机定子 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴的自感
$k_s$	整步转矩系数	$L_{ad}$	直轴电枢反应电感
$k_{if}$	定子基值电流与励磁绕组基值电流之比	$L_{aq}$	交轴电枢反应电感
$k_{uf}$	定子基值电压与励磁绕组基值电压之比	$L_{\sigma r}$	感应电机定子绕组的漏感
$L_s$	计及定子相邻两相的互感作用后,感应电机定子每相的总自感(即同步电感)	$L_{\sigma r}$	感应电机转子绕组的漏感
$L_r$	计及转子相邻两相的互感作用后,感应电机转子每相的总自感	$L_s(s)$	感应电机定子的运算电感
$L_\alpha, L_\beta$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴的自感	$M_s$	感应电机定子三相绕组间互感的负值
$L_d$	直轴同步电感	$M_r$	感应电机转子三相绕组间互感的负值
$L_q$	交轴同步电感	$M_t$	双笼型电机下笼等效三相绕组间互感的负值
$L_0$	零序电感	$M_4$	双笼型电机上笼与下笼对应相之间的互感
$L_b$	定子电感的基值	$M_5$	双笼型电机上笼与下笼非对应相之间的互感
$L_\sigma$	同步电机的定子漏感	$M_\sigma$	双笼型电机上、下笼的互漏感
$L'_s$	感应电机定子的瞬态电感	$M_{\sigma r}$	感应电机定、转子相绕组间互感的幅值
$L$	整个电机的电感矩阵	$M_{AB}(M_{BA}), M_{BC}(M_{CB}), M_{CA}(M_{AC})$	同步电机定子 A、B 相、B、C 相和 C、A 相绕组间的互感
$L_s$	定子绕组的自感矩阵	$M_{s0}$	同步电机定子三相绕组间互感的恒定



	分量	$s$	转差率;拉普拉斯变换中的复变量
$M_{s2}$	同步电机定子三相绕组间互感中二次谐波的幅值	$T$	转矩;时间常数
$M_{af}$	同步电机定子相绕组与励磁绕组间互感的幅值	$T_b$	转矩的基值
$M_{ad}$	同步电机定子相绕组与直轴阻尼绕组间互感的幅值	$T_e$	电磁转矩
$M_{aq}$	同步电机定子相绕组与交轴阻尼绕组间互感的幅值	$T_L$	负载转矩
$M_{fd}$	励磁绕组与直轴阻尼绕组间的互感	$T_1$	原动机的驱动转矩
$M_{\alpha\beta} (M_{\beta\alpha})$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中,同步电机定子 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴绕组间的互感	$T_{st}$	感应电动机的起动转矩
$M_{sr}, M_{rs}$	感应电机(同步电机)转子绕组对定子绕组和定子绕组对转子绕组的互感矩阵	$T_{e(av)}$	电磁转矩的平均值
$P_e$	电磁功率	$T_{e(2st)}$	以频率 $2st$ 脉振的脉振电磁转矩
$P_\Omega$	转换功率	$T_s$	转子开路时感应电机定子绕组的时间常数
$P_2$	同步发电机定子端的输出功率	$T_r$	定子开路时感应电机转子绕组的时间常数
$p$	时间的微分算子( $p = \frac{d}{dt}$ )	$T'_s$	感应电机定子的瞬态时间常数
$p_0$	极对数	$T'_r$	感应电机转子的瞬态时间常数
$R$	电阻	$T_a$	同步电机的电枢时间常数
$R_s$	感应电机定子的每相电阻	$T_f$	励磁绕组的时间常数
$R_r$	感应电机三相转子的每相电阻	$T_D$	直轴阻尼绕组的时间常数
$R_l$	双笼型转子下笼等效三相绕组的每相电阻	$T_Q$	交轴阻尼绕组的时间常数
$R'_r$	归算到定子边时 $R_r$ 的归算值	$T'_f$	励磁绕组的瞬态时间常数(定子短路、直轴阻尼绕组开路)
$R_a$	同步电机定子(电枢)的每相电阻	$T'_D$	直轴阻尼绕组的瞬态时间常数(定子短路、励磁绕组开路)
$R_f$	励磁绕组电阻	$T'_d$	直轴瞬态时间常数
$R_D$	直轴阻尼绕组电阻	$T''_d$	直轴超瞬态时间常数
$R_Q$	交轴阻尼绕组电阻	$T''_q$	交轴超瞬态时间常数
$R_0$	零序电阻	$T''_{d0}$	定子开路时的直轴瞬态时间常数
$R_-$	负序电阻	$T''_{q0}$	定子开路时的直轴超瞬态时间常数
$R_\Omega$	旋转阻力系数	$T_{D\sigma}$	直轴阻尼绕组的漏磁时间常数
$R$	整个电机的电阻矩阵	$T_{f\sigma}$	励磁绕组的漏磁时间常数
$R_s$	定子绕组的电阻矩阵	$T_{a1}$	单相突然短路时同步电机的电枢时间常数
$R_r$	转子绕组的电阻矩阵	$T_{a2}$	线间突然短路时同步电机的电枢时间常数
$R'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的电阻矩阵	$T'_{d1}$	单相突然短路时的直轴瞬态时间常数
$R'_s$	坐标变换后,在新坐标系中定子的电阻矩阵	$T'_{d1}$	单相突然短路时的直轴超瞬态时间常数
$R'_r$	坐标变换后,在新坐标系中转子的电阻矩阵	$T'_{d2}$	线间突然短路时的直轴瞬态时间常数
$S_b$	视在功率的基值	$T''_{d2}$	线间突然短路时的直轴超瞬态时间常数
		$t$	时间
		$t_b$	时间的基值
		$U_d, U_q$	同步电机直轴和交轴电压 $u_d$ 和 $u_q$ 的拉普拉斯变换
		$U_f$	励磁电压 $u_f$ 的拉普拉斯变换
		$U_m$	定子相电压的幅值
		$\dot{U}_d, \dot{U}_q$	同步电机定子的直轴和交轴电压相量
		$U_s$	$u_s$ 的拉普拉斯变换



$u_A, u_B, u_C$	同步电机(感应电机)定子 A 相、B 相和 C 相绕组的端电压	$X_\sigma$	同步电机的定子漏抗
$u_a, u_b, u_c$	感应电机转子 a 相、b 相和 c 相绕组的端电压	$X_0$	同步电机的零序电抗
$u_d, u_e, u_f$	双笼型电机下笼等效三相绕组的端电压	$X_-$	同步电机的负序电抗
$u_d, u_q$	在 $dq0$ 坐标系中同步电机定子的直轴和交轴电压	$X_{ad}$	直轴电枢反应电抗
$u_b$	同步电机定子电压的基值	$X_{aq}$	交轴电枢反应电抗
$u'_a, u'_b, u'_c$	归算到定子绕组时转子电压 $u_a, u_b$ 和 $u_c$ 的归算值	$X_{ff}$	励磁绕组的自感电抗
$u_1, u_2$	在 120 坐标系中定子电压的正序和负序分量	$X_{f\sigma}$	励磁绕组的漏抗
$u_\alpha, u_\beta$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机定子电压的 $\alpha$ 分量和 $\beta$ 分量	$X_{af}(X_{fa})$	定子相绕组与励磁绕组间互感电抗的幅值
$u_f$	励磁绕组的端电压	$X_{DD}$	直轴阻尼绕组的自感电抗
$u_{fb}$	励磁绕组的基值电压	$X_{D\sigma}$	直轴阻尼绕组的漏抗
$u_{s\alpha}, u_{s\beta}, u_{s0}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中感应电机定子电压的 $\alpha, \beta, 0$ 分量	$X_{aD}(X_{Da})$	定子相绕组与直轴阻尼绕组间互感电抗的幅值
$u_{r\alpha}, u_{r\beta}, u_{r0}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中感应电机转子电压的 $\alpha, \beta, 0$ 分量	$X_{Df}(X_{Df})$	励磁绕组与直轴阻尼绕组间的互感电抗
$u$	整个电机的电压矩阵	$X_{Qq}$	交轴阻尼绕组的自感电抗
$u_s$	定子的电压矩阵; 定子电压的空间矢量	$X_{Q\sigma}$	交轴阻尼绕组的漏抗
$u_r$	转子的电压矩阵; 转子电压的空间矢量	$X_{\alpha\alpha}, X_{\beta\beta}$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机定子 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴的自感电抗
$u'$	坐标变换后, 在新的坐标系中整个电机的电压矩阵	$X_{\alpha\beta}(X_{\beta\alpha})$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中同步电机定子 $\alpha$ 轴与 $\beta$ 轴的互感电抗
$u'_s$	转换到新坐标系中时定子的电压矩阵; 转换到转子坐标系时定子电压的空间矢量	$X_{sr}$	感应电机的定子漏抗
$u'_r$	转换到新坐标系中时转子的电压矩阵; 转换到定子坐标系时转子电压的空间矢量	$X_{rr}$	感应电机的转子漏抗
$u_{sk}$	在任意转速的通用坐标系中定子电压的空间矢量	$X_m$	感应电机的激磁电抗
$u_{rk}$	在任意转速的通用坐标系中转子电压的空间矢量	$X_{M\sigma}$	双笼型电动机中上、下笼的互漏抗
$v$	状态方程中的控制矢量	$X_{Df\sigma}$	励磁绕组与直轴阻尼绕组间的互漏抗
$X$	电抗	$X'_d$	直轴瞬态电抗
$X_C$	电容 $C$ 的容抗	$X''_d$	直轴超瞬态电抗
$X_d$	直轴同步电抗	$X''_q$	交轴超瞬态电抗
$X_q$	交轴同步电抗	$X'_s$	感应电机定子的瞬态电抗
		$X''_f$	励磁绕组的瞬态电抗
		$X_d(p), X_q(p)$	同步电机的直轴和交轴运算电抗
		$X_d(js), X_q(js)$	转子转差率为 $s$ 时直轴和交轴的复运算电抗
		$X_d(j\lambda), X_q(j\lambda)$	功角作频率为 $\lambda$ 的正弦小振荡时直轴和交轴的复运算电抗
		$x$	状态矢量
		$Y_d(js), Y_q(js)$	$X_d(js)$ 和 $X_q(js)$ 的倒数
		$Z$	阻抗
		$Z_b$	定子的阻抗基值
		$Z_d, Z_q$	$dq0$ 坐标系中直轴和交轴的自阻抗
		$Z_f, Z_b$	$f\beta 0$ 坐标系中 $f$ 轴和 $b$ 轴的自阻抗
		$Z_+$	三相电机的正序阻抗
		$Z_-$	三相电机的负序阻抗

$Z_0$	三相电机的零序阻抗	$\psi_a, \psi_b, \psi_c$	转子 a 相、b 相和 c 相绕组的磁链
$Z$	整个电机的阻抗矩阵	$\psi_d, \psi_e, \psi_f$	双笼型电机下笼等效三相绕组 d、e、f 的磁链
$Z'$	坐标变换后,在新的坐标系中整个电机的阻抗矩阵	$\psi_f$	励磁绕组的磁链
$Z_{m1}, Z_{m2}$	三相旋转电机的循环对称阻抗中, B 相对 A 相和 C 相对 A 相的互阻抗	$\psi_D$	直轴阻尼绕组的磁链
$Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}$	三回路电路中三个回路的自阻抗	$\psi_Q$	交轴阻尼绕组的磁链
$Z_{12}, Z_{23}, Z_{31}$	三回路电路中回路 1、2、3 和 3、1 的互阻抗	$\psi_\alpha, \psi_\beta, \psi_0$	在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中 $\alpha$ 轴、 $\beta$ 轴和零序的磁链
$Z_b$	励磁绕组的阻抗基值	$\psi_d, \psi_q$	在 $dq0$ 坐标系中直轴和交轴的磁链
$Z_{Db}$	直轴阻尼绕组的阻抗基值	$\psi_b$	定子磁链的基值
$\alpha_1, \alpha_2$	感应电动机起动瞬态时主磁场和漏磁场的衰减因数	$\psi_b$	励磁绕组磁链的基值
$\gamma, \gamma'$	$+90^\circ$ 和 $-90^\circ$ 旋转矩阵	$\psi_{Db}$	直轴阻尼绕组磁链的基值
$\delta$	功角;气隙磁场与转子磁动势的空间夹角	$\psi_s$	定子绕组的磁链矩阵;定子磁链的空间矢量
$\theta$	感应电机转子 a 相轴线与定子 A 相轴线的夹角(电角);同步电机转子直轴与定子 A 相轴线的夹角(电角)	$\psi_r$	转子绕组的磁链矩阵;转子磁链的空间矢量
$\theta_0$	$t=0$ 时 $\theta$ 角的初值	$\psi_r'$	转换到定子坐标系的转子磁链空间矢量
$\lambda$	同步电机功角的振荡频率(标么值)	$\psi_{sk}$	在任意转速的通用坐标系中定子磁链的空间矢量
$\lambda_\delta$	同步电机定、转子间单位面积的气隙磁导	$\psi_{rk}$	在任意转速的通用坐标系中转子磁链的空间矢量
$\lambda_{g0}$	$\lambda_\delta$ 的平均值	$\Psi_s$	$\psi_s$ 的拉普拉斯变换
$\lambda_{g2}$	$\lambda_\delta$ 中二次谐波的幅值	$\Psi_r'$	$\psi_r'$ 的拉普拉斯变换
$\sigma_D$	励磁绕组与直轴阻尼绕组间的漏磁系数	$\Omega$	转子的机械角速度
$\Psi_d, \Psi_q$	$\psi_d$ 和 $\psi_q$ 的拉普拉斯变换	$\Omega_b$	机械角速度的基值
$\dot{\Psi}_d, \dot{\Psi}_q$	同步电机定子直轴和交轴的磁链相量	$\omega_1$	定子(电网)的角频率
$\psi_A, \psi_B, \psi_C$	定子 A 相、B 相和 C 相绕组的磁链	$\omega_b$	角频率的基值
		$\omega_r$	转子旋转的角速度(以电角计)
		$\omega_k$	通用坐标系旋转的角速度(以电角计)

# 目 录

第2版前言  
第1版前言  
主要符号表

<b>第1章 绪论</b> .....	1	<b>第4章 同步电机的运动方程</b> .....	78
1.1 交流电机动态分析的发展 .....	1	4.1 在相坐标系中同步电机的运动方程 .....	78
1.2 交流电机动态分析的特点和步骤 .....	3	4.2 在 $dq0$ 坐标系中同步电机的运动方程 .....	83
1.3 常用的数学方法 .....	5	4.3 同步电机的标么值 .....	89
1.4 坐标变换 .....	8	4.4 用标么值表示时 $dq0$ 坐标系中同步电机的运动方程 .....	92
1.5 常用的坐标系和坐标变换 .....	11	4.5 在 $\alpha\beta0$ 坐标系中同步电机的运动方程 .....	96
1.6 交流电机的等效电路 .....	20	4.6 用120分量和空间矢量表示时同步电机的运动方程 .....	99
参考文献 .....	26	4.7 同步电机的状态方程 .....	101
<b>第2章 三相感应电动机的运动方程</b> .....	28	4.8 同步电机的运算电抗及其等效电路 .....	107
2.1 在ABC坐标系中感应电动机的运动方程 .....	28	4.9 用微分算子形式的运算电抗和传递函数表示时, $\alpha\beta0$ 和120坐标系中的磁链方程 .....	123
2.2 在 $\alpha\beta0$ 坐标系中感应电动机的运动方程 .....	33	参考文献 .....	125
2.3 转子量变换到定子坐标系时感应电动机的运动方程 .....	37	<b>第5章 同步电机的稳态异步运行</b> .....	127
2.4 用空间矢量表示时感应电动机的运动方程 .....	41	5.1 同步电机的对称稳态同步运行 .....	127
2.5 在任意转速的通用坐标系中感应电动机的运动方程 .....	44	5.2 同步电动机的稳态异步运行 .....	130
2.6 感应电动机的状态方程 .....	46	5.3 同步电机的负序电抗 .....	137
2.7 双笼型感应电动机的运动方程 .....	51	5.4 功角作正弦小振荡时同步电机的电磁转矩 .....	142
参考文献 .....	55	5.5 正弦大振荡时同步电机的整步转矩和阻尼转矩系数 .....	148
<b>第3章 感应电动机的动态分析</b> .....	56	参考文献 .....	150
3.1 恒速投入电网时三相感应电动机的电磁瞬态 .....	56	<b>第6章 同步电机的动态分析</b> .....	152
3.2 三相感应电动机起动过程的动态分析 .....	63	6.1 同步发电机的三相突然短路 .....	152
3.3 突加负载时三相感应电动机的动态过程 .....	65	6.2 线间突然短路 .....	160
3.4 三相感应电动机瞬间断电后重新投入电网时的动态过程 .....	68	6.3 单相突然短路 .....	172
3.5 三相感应电动机的突然短路 .....	71	6.4 定子接有电容时同步电机的运行 .....	180
参考文献 .....	76	6.5 突加负载时同步电动机的动态分析 .....	187
		6.6 凸极同步电动机的牵入同步 .....	191
		参考文献 .....	198

第7章 交流电动机的调速 .....	200	参考文献 .....	238
7.1 交流电动机的电磁转矩和电力 传动 .....	200	附录 .....	240
7.2 空间矢量与矢量控制 .....	206	附录 A 凸极同步电机定子绕组的自感 和互感 .....	240
7.3 三相感应电动机基于转子磁场的 矢量控制 .....	208	附录 B $dq0$ 变换的导出 .....	242
7.4 感应电动机的矢量控制方程 .....	214	附录 C 常用数学表达式的傅里叶级数 展开 .....	245
7.5 三相感应电动机的直接转矩控制 .....	227	附录 D 感应电动机的自感、互感和 T 形 等效电路中各电抗的关系 .....	247
7.6 同步电动机的矢量控制 .....	235		

# 第 1 章 绪 论

本章先介绍交流电机动态分析的发展过程和动态分析的步骤；接着，作为预备知识，对求解常微分方程的两个常用数学方法作出简要说明；最后对动态分析中常用的坐标变换和等效电路问题作出较为详细的说明。这些方法和内容，在其他各章中都会用到。

## 1.1 交流电机动态分析的发展

20 世纪初，交流电机的基本类型及其稳态运行理论已经基本建立。1920 年以后，交流电机理论的发展进入一个新时期，即瞬态和动态运行理论的建立和发展时期。此时期大体上又可分成三个阶段，下面进行简要介绍。

### 1. 交流电机瞬态分析理论的建立

1926 ~ 1930 年，道赫提 (Doherty) 和聂克尔 (Nickle) 发表了五篇经典论文，阐明了同步电机的气隙磁导、稳态运行时同步电机的电压方程、同步电抗和功角特性；瞬态时的功角特性；同步发电机的单相突然短路和三相突然短路等一系列问题；发展了勃朗台尔 (Blondel) 的双反应理论，初步建立起瞬态分析的理论 and 近似计算方法。同一时期，司蒂芬生 (Stevenson) 和派克 (Park)，以及魏斯曼 (Wiesmann) 又提出了气隙磁场、槽内和极间漏磁场的图解确定法，阿尔求 (Alger)、派克 (Park)、基尔国 (Kilgore) 又先后提出了电枢漏抗、同步电抗和直轴瞬态电抗的计算方法和计算公式，为同步电机稳态和瞬态参数的计算确立了基础。

1928 年，派克 (Park) 发表了“理想同步电机的定义和电枢磁链公式”一文。1929 年，派克又发表了“同步电机的双反应理论 ( I ) 一通用分析方法”的经典论文，提出了  $dq0$  变换和著名的派克方程，以及运算电抗的概念等一系列思想。以后，又经过沃林 (Waring)、克拉莱 (Crary)、康柯蒂亚 (Concordia)、阮京 (Rankin)、司坦莱 (Stanley) 和克拉克 (Clarke) 等一批学者的努力，使交流电机的瞬态分析理论得以建立。

### 2. 通用电机理论的建立

1935 ~ 1938 年，经过对各类电机的综合考察，克朗 (Kron) 提出了原型电机的概念，并用电磁学和力学的基本定律 ( 汉弥尔登原理和拉格朗日方程 ) 导出了原型电机的运动方程。原型电机有两种，一种是定、转子绕组的轴线在空间均为固定不动的第一种原型电机；另一种是定子绕组轴线在空间固定不动、转子绕组轴线在空间以转子转速旋转的第二种原型电机。以张量为工具，克朗 (Kron) 阐明，任何电机的运动方程都可以从原型电机的运动方程导出，线圈的连接、电刷或集电环的引入，对称分量法或其他各种分量的应用等，都相当于一定的坐标变换。这一理论称为通用电机理论。

从原型电机出发，经过下列步骤，即可导出所研究电机的运动方程：

(1) 先列出所研究电机的动态电路模型。

(2) 把此模型与具有相应线圈数的原型电机对比, 建立“联系张量”。

(3) 从原型电机的运动方程出发, 通过联系张量进行规定的变换, 即可导出所研究电机的运动方程。

通用电机理论的建立, 不但揭示了各种电机和各种分析方法之间的联系, 从而使电机理论趋于统一, 而且还为许多复杂问题的求解提供了途径, 所以它是电机理论的一个重大发展。

以后, 克朗 (Kron) 又提出了建立旋转电机等效电路的条件, 以及在稳态和瞬态情况下各种电机的等效电路, 为工程计算和应用带来很大的方便。

### 3. 计算机的引入和交流电机动态分析的实现

1940年和1951年, 莱昂 (Lyon) 和顾毓琇先后提出了120分量和 $\beta 0$ 分量, 这两种分量都是复数分量。1954年, 柯伐煦 (Kovács) 提出了空间向量法, 并导出在角速度为任意值 $\omega_k$ 的旋转坐标系中, 感应电机的空间向量电压方程, 为感应电机的调速和转矩控制打下了理论基础。但是在计算机引入以前, 对交流电机的绝大部分分析和研究工作都是针对瞬态问题进行的; 对于转速为未知量的动态问题, 除极少数借助于微分分析器和动态模型机组而得到解答之外, 其余则无法求出解答。

1965年以后, 计算机逐步被引入到电机工程的各个领域, 先是模拟计算机, 然后是数字计算机。由于数字计算机的快速发展和各种数值方法和软件包的应用, 目前在微机上即可较快且方便地算出电机内的磁场分布、参数的不饱和及饱和值。由于状态方程和数值解法的引入, 动态运行时交流电机的非线性方程亦得以顺利解出, 使各种动态问题的计算、分析得以实现。这是电机分析中的又一次突破。

1971年, 勃拉舒克 (Blaschke) 根据坐标变换理论, 将交流电机的磁场解耦, 模拟直流电机转矩的控制规律, 提出交流电机的“矢量变换控制”, 加上电力电子和变频技术的发展, 使交流电机的调速和转矩控制技术发生了一次飞跃。

1992~1999年, 岱谋达煦 (Demerdash) 所领导的课题组提出一种场路结合的有限元-状态空间耦合时步法。此法先用三维非线性恒定磁场的有限元法, 求得定、转电流和转子位置为某一组设定值时电机的饱和参数; 再用此饱和参数代入状态方程, 用数值法解出动态过程中某一步长时定、转子电流和转子位置的即时值; 再用修正的电流和位置值重新计算参数。这样多次往复迭代, 即可得到该步长时参数、电流和转子位置的确认值。然后一个步长、一个步长地往前计算, 最后得到整个动态过程中的电流、转速、转矩、功角等。由于此法适用于任意供电波形的动态过程, 既考虑了动态过程中参数的饱和值及其变化, 又避免了用时步法直接求解电机内的三维非线性瞬态场, 所以既减少了计算难度和计算时间, 又可得到较高的精度, 从而使交流电机的动态计算又前进一步。

当然, 最终的理想目标是, 利用求解定、转子具有相对运动的瞬态非线性三维涡流场的时步法, 来求解任意供电波形下交流电机的动态过程。在做到这一步以前, 目前还有一些实际问题需要解决。

## 1.2 交流电机动态分析的特点和步骤

### 1. 动态分析的特点

交流电机动态运行时,电机内的各物理量(电压、电流、定、转子间的互感、电磁转矩和转速等)随时间而变化,所以各量都用瞬时值表示,电机的运动方程(包括电压方程和转矩方程)以微分方程的形式表达,这是一个特点。

动态分析时,由于电磁转矩是一个非线性项,所以转矩方程一般是非线性的;由于定、转子绕组之间的相对运动和某些电机的凸极转子(或定子)所造成的磁不对称性,交流电机的电压方程通常是含有时变系数的微分方程;这是动态分析的另一个特点。若进一步考虑磁饱和的影响,由于电感的非线性,电压方程就可能成为非线性微分方程。在转速设为常值和不计磁饱和的条件下,通过坐标变换,电压方程可变换为常系数线性微分方程,并得到解析解。但是对于一般的动态问题,由于整个运动方程是一组非线性微分方程组,所以必须用数值法和计算机来解算,才能得到具体问题的数值解。

### 2. 动态分析的步骤

交流电机动态分析的步骤大体为:①建立物理模型。②建立数学模型。③求解运动方程。④分析计算结果并得出结论。简单说明如下。

**建立物理模型** 所谓物理模型,就是分析人员根据研究或者设计的目的,从具体电机抽象和合理简化后所得到的装置。模型可分成场模型和路模型两类。对于交流电机,最常用的模型是“动态耦合电路模型”,这种模型把旋转电机看成是一组具有电磁耦合和相对运动的多绕组电路。模型确立后,接着是利用电磁学和力学的方法来确定其电磁和力学参数,如电阻、电感、转动惯量和旋转阻力系数等。

**建立数学模型** 建立数学模型,就是在一些合理和必要的假定基础上(例如理想电机的假定),利用电磁学和力学的基本定律,来建立模型外部的输入、输出和模型内部的电磁和机电关系间的数学方程式,即电机的电压方程和转矩方程;这两个方程合在一起,统称为电机的运动方程。由于建模方法、变量选择、观察特性的角度不同,对于同一电机,导出的运动方程可以具有不同的形式。

工程上大多用模型来代替实际电机进行研究和分析,所以建立物理模型和数学模型是一件非常重要的工作,需要充分发挥分析人员的学识和分析、判断能力,才能得到既符合物理情况、又便于分析、计算,且具有较高精度的模型。

**求解运动方程** 按照微分方程的性质,动态运行时交流电机的运动方程一般可分成三类:①常系数线性微分方程;②时变系数的微分方程;③非线性微分方程。对于常系数线性微分方程,无论外部的输入(驱动)函数是什么形式,总可以用拉普拉斯变换或其他方法求出其解析解,此时研究线性定常系统的整套方法(例如等效电路、框图、传递函数、频率特性等),在不同的场合下都可以发挥其作用。如果运动方程是时变系数的线性微分方程,则在理想电机的假定下,通过坐标变换,常常可以把它变换为常系数线性微分方程,从而得到解析解;如果不作坐标变换,则可利用求解非线性微分方程的办法,用计算机求出具



体问题的数值解。对于非线性微分方程，又可分成两种情况：一种是局部、小范围的非线性，另一种则是大范围或者整体的非线性；前者可以在工作点附近进行线性化，使增量方程变成线性微分方程来求解，后者则必须用数值法和计算机来求解。

按照问题的性质，则大体上可以分成三类：①转速设为常值的电磁瞬态或稳态运行问题。②转速不是常值，但其变化规律已经给定的振荡类问题。③转速是未知量的动态运行问题。对于转速设为常值的这类问题（例如同步发电机的三相突然短路，同步电动机的稳态异步运行问题），转矩方程不用求解而省略，问题从动态问题简化为单纯求解电压方程的电磁瞬态或稳态运行问题，此时通过坐标变换和拉普拉斯变换（稳态问题仅需用复数法）即可得到解析解。对于转速不是常值而是作周期性振荡这类问题，若振荡是小振荡，通过坐标变换，电压方程可简化为线性常系数微分方程，并得到电流和电磁转矩的解析解；若振荡为大振荡，除少数问题可用贝塞尔函数求得解析解以外，多数问题只能用计算机求出其数值解。最后，对于转速为未知量的动态问题，因为需要联立求解包括转矩方程在内的整个非线性运动方程组，故只能用计算机算出具体问题的数值解。

**结果分析** 解答求出后，通常应画出各主要变量随时间变化的曲线，例如  $i(t)$ 、 $n(t)$ 、 $T_e(t)$ 、 $\delta(t)$  等，以及主要变量之间的相互关系曲线，如  $T_e-s$  曲线或  $T_e-\delta$  曲线等，并得到动态过程中主要变量的一些极值，如  $i_{\max}$ 、 $n_{\max}$ 、 $T_{e\max}$ 、 $\delta_{\max}$  等。另一方面还应设法找出各种所需的指标，如稳定性，温升、过电压和绕组上的机械力等，最后通过分析得出一些有用的结论。

### 3. 理想电机的基本假设

在建立交流电机的运动方程时，为便于分析，常常要作出一些必要而合理的简化假设，例如假设电机为“理想电机”。“理想电机”原先是针对同步电机提出的，以后被扩大到感应电机。理想电机的基本假设如下：

- (1) 电机的磁路为线性，铁心中的磁滞和涡流损耗忽略不计。
- (2) 气隙磁场在空间为正弦分布，磁场的高次谐波忽略不计。
- (3) 定、转子表面设为光滑，齿、槽的影响用卡氏系数来计及。
- (4) 直轴和交轴气隙可以不等，但气隙的比磁导可以用平均比磁导加上二次谐波比磁导来表示。
- (5) 对于三相交流电机，定子绕组为对称三组绕组。

基于上述假定，可知：

- (1) 有关磁场和相应的感应电动势的分析，可以利用叠加原理。
- (2) 定子和转子的所有电感都是线性，与绕组内的电流大小无关。
- (3) 表征铁心损耗的激磁电阻  $R_m = 0$ 。
- (4) 定、转子绕组间的互感可用  $M_{sr} \cos\theta_{sr}$  来表示，其中  $\theta_{sr}$  为两个绕组轴线间的夹角（电角）。
- (5) 对凸极电机，定子绕组的自感可用  $L_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta$  表示，其中  $\theta$  为该相绕组的轴线与直轴之间的夹角；互感可用  $-M_{s0} + M_{s2} \cos 2(\theta + \alpha)$  表示，其中  $\alpha = 0^\circ$ 、 $120^\circ$  或  $-120^\circ$ 。
- (6) 三相绕组自身的电感为循环对称。

实际运行时，电机的磁路总会出现磁饱和现象，此时可引入电感的饱和值或动态电感来

计及饱和的影响；气隙磁场的高次谐波，包括由斜槽所引起谐波磁场，则可引入谐波漏抗和斜槽漏抗来近似计及其影响。

### 1.3 常用的数学方法

在求解交流电机的动态和电磁瞬态问题时，有两种常用的数学方法。对于转速为常值、电压方程为线性常系数微分方程的情况，可以用拉普拉斯变换法来求瞬态问题的解析解。对于转速为未知变量的情况，由于电机的运动方程为一组非线性和含有时变系数的微分方程组，通常先把运动方程改写成状态方程的形式，然后用数值法和计算机求出其数值解。数值法中最常用的是四阶龙格-库塔法。

#### 1. 拉普拉斯变换

拉普拉斯变换（简称拉氏变换）是一种积分变换，它可以把实时域内的线性常系数微分方程，变换成复域内的复代数方程；求解此复代数方程，得到它在复域内的解答后，再通过拉氏逆变换，即可得到时域内的解答。此法的优点是：①变换和求解过程中，可以同时计及问题的初始条件。②利用有关定理，可以很快确定解的初值和终值，对于仅需知道瞬态初值和稳态值的某些问题，这是很方便的。③大多数解答可以从拉氏变换表直接查出，省去了许多运算。

**拉氏变换的定义** 设  $f(t)$  为时间  $t \geq 0$  时具有定义的函数，复变函数  $F(s)$  在  $s$  平面的某一区域内收敛，则用下列积分所确定的变换，就称为  $f(t)$  的拉氏变换，记为  $F(s)$ ，即

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1-1)$$

式中， $s$  为复参变量， $s = c + j\omega$ ， $c > \sigma$ ， $\sigma$  为收敛横坐标。 $F(s)$  的逆变换即为  $f(t)$ ，

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st} ds \quad (t \geq 0, c \geq 0) \quad (1-2)$$

拉氏变换有一种变形，称为卡松变换，其定义为

$$\left. \begin{aligned} F(p) &= \mathcal{L}[f(t)] = p \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt \\ f(t) &= \mathcal{L}^{-1}[F(p)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \frac{1}{p} F(p)e^{pt} dp \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

卡松变换亦称为拉氏变换的  $p$  乘形式。在查阅拉氏变换表时，要注意所查的是哪一种变换表，以免出错。

**基本性质** 拉氏变换有下列性质：

(1) 线性性质

$$\mathcal{L}[f_1(t) + f_2(t)] = F_1(s) + F_2(s) \quad (1-4)$$

(2) 导数和积分

$$\mathcal{L}\left[\frac{df}{dt}\right] = sF(s) - f(0) \quad (1-5)$$

式中  $f(0)$  为  $t=0$  时  $f(t)$  的初值；

$$\mathcal{L}\left[\int_0^t f(\tau) d\tau\right] = \frac{F(s)}{s} \quad (1-6)$$