



iCourse · 教材

# 电机学重点难点解析

李 勇 主编

戈宝军 主审

高等教育出版社



# 电机学重点难点解析

李 勇 主编  
赵 猛 王 骞 副主编  
戈宝军 主审

RFID



高等教育出版社·北京



## 内容提要

本书为中国大学 MOOC 国家精品在线开放课程“电机学”的配套教材。全书一体化设计,将重点难点讲课视频、彩色图片制作成二维码,扫描即可观看。本书主要针对电机学课程难点多、理解不直观等问题,以磁路、变压器、交流绕组、感应电机、同步电机、直流电机和特种电机内容为主,以 MATLAB 为主要工具,采用“化繁为简”原则,对 33 个重点难点案例,15 个典型习题和 43 个仿真专题进行了分析。

本书主要作为电机学课程的辅助教材,应用对象是电机学授课教师、电气工程领域的研究生、本科生、专科生和其他工程技术人员。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机学重点难点解析/李勇主编.--北京:高等教育出版社,2019.8

ISBN 978-7-04-052240-2

I. ①电… II. ①李… III. ①电机学-高等学校-教学参考资料 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 140919 号

策划编辑 孙琳  
插图绘制 于博

责任编辑 孙琳  
责任校对 商红彦 刘娟娟

封面设计 张楠  
责任印制 田甜

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印刷 三河市宏图印务有限公司  
开本 787mm×1092mm 1/16  
印张 12  
字数 260 千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2019 年 8 月第 1 版  
印 次 2019 年 8 月第 1 次印刷  
定 价 25.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 52240-00

# 电机学 重点难点 解析

李 勇

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1258141>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至[abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。



扫描二维码  
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/1258141>

# 前言

“电机学”是高等学校电气类专业非常重要的一门专业主干课,是电路、模拟电子技术、数字电子技术等专业基础课和电机设计、电机测试、电力系统分析等专业课之间的桥梁,“电机学”课程的重要性是不言而喻的。但是,由于课程中涉及的知识领域多,内容上难点多,“电机学”课程一直是电气类学生学习的一大拦路虎,想学好、学透非常困难。

“电机学”之所以难学,主要原因有两点。一是有很多重点难点问题不容易理解透,需要给学生们指出症结阐明方法,比如变压器中的恒磁通问题;二是有很多内容枯燥难懂,有些知识看不见摸不着,只能通过一些形象思维在脑海中形成图像或者动画才能理解,比如旋转磁场;有些知识限于分析手段和知识体系,只能定性分析而没有定量的计算结果,比如感应电机空载起动等。而这些问题,采用信息化技术及计算机仿真等手段是可以解决的。对现在的学习者,掌握一些计算机仿真手段,对学习其他知识,提高分析问题解决问题能力,更好地适应信息化社会发展是大有裨益的。

本书就是针对上述两个问题编写而成的,强调实用性,以最直接的方式解决同学们电机学课程学习中的问题。全书共分5章,第1章是绪论,主要介绍计算机辅助分析与仿真的作用以及应用方式。第2章是计算机辅助分析与仿真的工具和方法,主要介绍MATLAB的仿真功能与应用速成,以及电机学仿真分析中常用的数值计算方法,如数值插值、曲线拟合、傅里叶分解、常微分方程求解和数值积分等。第3章是电机学重点难点案例分析,从最常见的变压器、直流电机、交流绕组、感应电机和同步电机五大部分内容中,总结提炼了33个重点难点案例进行分析阐述,并讲解了15个典型习题的求解思路。第4章是电机学常见重点难点的仿真分析,主要介绍电机学中常见的重点难点问题及其仿真分析方法,选取了包括磁路内容在内的37个问题,每个问题都包括仿真目的、基本知识、仿真要点、仿真实例和仿真结果五个方面。第5章是特种电机的仿真分析,主要介绍无刷直流电机和开关磁阻电机共6个问题的仿真分析。附录中给出了所有仿真问题的源程序,便于学习者在学习中参照使用。

本书由中国大学MOOC国家精品在线开放课程“电机学”负责人李勇教授和授课团队成员赵猛副教授、王骞副教授等编著。李勇教授完成了第1章、第2章、第3章、第4章主体内容的编写,研究生禹国栋、赵程分别参与了第4章部分内容的MATLAB编程。赵博研究员参与了第2章部分内容的编写,赵猛副教授完成了第5章主体内容的编写,指导研究生孙全浩完成了所有源程序和仿真模型的调试,并全面负责本科生的仿真上机指导工作,王骞副教授负责编辑了书中所有的视频材料和辅助材料,并负责MOOC课程的运行管理。

本书的最大特色是电机学中33个重点难点案例,15个典型习题求解和43个仿真分析实例,力求“化繁为简”,把高难问题简单化,用形象化手段说清楚讲明白。另外,重点难点部分案例的分析中还链接了辅助教学资料,便于学习者融会贯通。

本书主要是作为电机学课程的辅助教材,应用对象是电机学授课教师、电气工程领域的研

究生、本科生、专科生和其他工程技术人员。

本书对应课程“电机学”获国家级精品在线开放课程,于2017年11月在中国大学MOOC上线。由于编写时间紧张,兼之编著者水平有限,书中难免存在一些不足和疏漏,恳请读者批评指正。作者邮箱:liyong611@hit.edu.cn。

作者

2019年5月于哈尔滨工业大学

# 主要符号表

$A$	面积, A 相, 电负荷	$F_m$	感应电机的激磁磁动势
$a$	交流绕组并联支路数, a 相	$F_f$	励磁磁动势
$a_{\Sigma}$	直流电机并联支路对数	$F_{ad}$	直轴电枢电动势
$B$	磁通密度(磁密), B 相	$F_{aq}$	交轴电枢电动势
$B_{\delta}$	气隙磁密	$F_{\varphi 1}$	单相绕组所产生的基波磁动势
$B_{ad}$	直轴电枢磁通磁密	$F_{\varphi v}$	单相绕组所产生的 $v$ 次谐波磁动势
$B_{aq}$	交轴电枢磁通磁密	$F_q$	$q$ 个线圈所产生的磁动势
$B_{\sigma}$	漏磁磁密	$F_c$	线圈磁动势换向极绕组磁动势
$B_{av}$	平均磁密	$F_{c1}$	线圈基波磁动势
$b$	宽度, b 相, 磁通密度瞬时值	$f$	频率, 力, 磁动势的瞬时值
$C$	C 相	$f_1$	定子频率
$C_T$	转矩常数	$f_2$	转子频率
$C_e$	电动势常数	$f_N$	额定频率
$c$	比热容, c 相	$f_v$	$v$ 次谐波频率
$D_a$	电枢外径	$H$	磁场强度
$D_i$	定子内径	$h$	高度
$E$	电动势(交流表示有效值)	$I$	电流(交流表示有效值), 直流电机的端电流
$E_m$	交流电动势幅值	$I_a$	同步电机和直流电机的电枢电流
$E_{\varphi}$	相电动势	$I_d$	直轴电枢电流
$E_0$	空载电动势	$I_q$	交轴电枢电流
$E_1$	变压器一次绕组(电机定子绕组)由主磁通感应的电动势有效值	$I_m$	交流励磁电流
$E_2$	变压器二次绕组(电机转子绕组)由主磁通感应的电动势有效值	$I_f$	直流励磁电流
$E'_2$	$E_2$ 的归算值	$I_{\mu}$	$I_m$ 中的磁化分量
$E_c$	线圈的电动势有效值	$I_{Fe}$	$I_m$ 中的铁损耗分量
$E_q$	$q$ 个线圈的合成电动势	$I_N$	额定电流
$e$	电动势瞬时值	$I_0$	空载电流
$e_c$	换向电动势	$I_k$	短路电流, 堵转电流
$e_r$	电抗电动势	$I_{st}$	起动电流
$F$	磁动势, 力	$I_1$	变压器一次侧(感应电机定子)电流
$F_a$	电枢磁动势	$I_2$	变压器二次侧(感应电机转子)电流
		$I'_2$	$I_2$ 的归算值
		$i$	电流瞬时值

$i_a$	直流电机的电枢导体电流	$P_2$	输出功率
$J$	转动惯量	$P_0$	空载功率
$j$	电流密度,虚数符号	$p$	损耗,极对数
$K$	换向片数,比例系数	$p_{Cu}$	铜损耗
$k$	常数,变压器的电压比	$p_{Fe}$	铁损耗
$k_i$	电流比	$p_k$	短路损耗
$k_e$	电动势比	$p_0$	空载损耗
$k_{d1}$	基波分布因数	$p_{\Delta}$	杂散损耗
$k_{p1}$	基波节距因数	$p_{\Omega}$	机械损耗
$k_{w1}$	基波绕组因数	$Q$	热量,槽数,无功功率
$k_{dv}$	$v$ 次谐波的分布因数	$Q_u$	电枢虚槽数
$k_{pv}$	$v$ 次谐波的节距因数	$q$	每极每相槽数
$k_{wv}$	$v$ 次谐波的绕组因数	$R$	电阻,直流电机电枢绕组电阻
$K_c$	短路比	$R_m$	励磁电阻,磁阻
$K_{\sigma}$	主极漏磁通系数	$R_1$	变压器一次侧(感应电机定子)电阻
$L$	自感	$R_2$	变压器二次侧(感应电机转子)电阻
$L_{1\sigma}$	变压器一次侧(感应电机定子)漏磁电感	$R_2'$	$R_2$ 的归算值
$L_{2\sigma}$	变压器二次侧(感应电机转子)漏磁电感	$R_f$	励磁绕组电阻
$l$	长度	$R_a$	直流电机电枢绕组总电阻(包括电枢绕组的电阻和电刷的接触电阻)
$M$	互感	$R_R$	端环电阻
$m$	相数	$R_B$	导条电阻
$m_1$	交流电机定子相数	$R_k$	变压器或感应电机的短路电阻
$m_2$	交流电机转子相数	$R_{\Omega}$	旋转阻力系数
$N$	直流电枢总导体数,交流电机每相串联匝数	$S$	视在功率
$N_c$	每个线圈的匝数	$S_N$	额定视在功率
$n$	转子转速	$s$	转差率
$n_N$	额定转速	$s_N$	额定转差率
$n_0$	空载转速	$s_m$	临界转差率
$n_s$	同步转速	$T$	转矩,时间常数,周期
$n_v$	$v$ 次谐波旋转磁场的转速	$T_c$	换向周期
$n_2$	转子基波旋转磁场相对于转子的转速	$T_N$	额定转矩
$\Delta n$	转差	$T_0$	空载转矩
$P$	功率	$T_e$	电磁转矩
$P_N$	额定功率	$T_{max}$	最大转矩
$P_e$	电磁功率	$T_{st}$	起动转矩
$P_{\Omega}$	感应电机的总机械功率	$T_2$	输出转矩
$P_k$	堵转功率,短路功率	$T_L$	负载转矩
$P_1$	输入功率		

$t$ 时间	$\delta$ 气隙,功率角
$U$ 电压(交流表示有效值)	$\varepsilon$ 小数,短距角
$U_N$ 额定电压	$\eta$ 效率
$U_\varphi$ 相电压	$\eta_N$ 额定效率
$U_1$ 电源电压,定子端电压	$\eta_{\max}$ 最大效率
$U_0$ 空载电压	$\theta$ 温度,角度
$U_k$ 短路电压,堵转电压	$\Delta\theta_0$ 初始温升
$u$ 电压的瞬时值	$\Delta\theta_\infty$ 稳态温升
$\Delta U^*$ 电压变化率	$\Lambda$ 磁导
$2\Delta U_s$ 每对电刷的电压降	$\Lambda_\sigma$ 漏磁导
$v$ 线速度	$\lambda$ 比漏磁导
$W$ 功,能	$\mu$ 磁导率
$X$ 电抗	$\mu_0$ 空气磁导率
$X_a$ 电枢反应电抗	$\mu_{Fe}$ 铁心磁导率
$X_{ad}$ 直轴电枢反应电抗	$\nu$ 谐波次数
$X_{aq}$ 交轴电枢反应电抗	$\rho$ 电阻率
$X_\sigma$ 定子漏抗	$\tau$ 极距
$X_s$ 同步电抗	$\Phi$ 磁通量
$X_d$ 直轴同步电抗	$\Phi_0$ 空载磁通
$X_q$ 交轴同步电抗	$\Phi_a$ 电枢反应磁通
$X_m$ 励磁电抗	$\Phi_m$ 变压器或感应电动机的磁通幅值
$X_k$ 短路电抗	$\Phi_\sigma$ 漏磁通
$X_{1\sigma}$ 变压器一次绕组(感应电机定子)漏电抗	$\Phi_{ad}$ 直轴电枢反应磁通
$X_{2\sigma}$ 变压器二次绕组(感应电机转子)漏电抗	$\Phi_{aq}$ 交轴电枢反应磁通
$X'_{2\sigma}$ $X_{2\sigma}$ 的归算值	$\Phi_v$ $v$ 次谐波磁通
$y$ 绕组合成节距	$\phi$ 磁通量的瞬时值
$y_1$ 第一节距	$\varphi$ 相角,功率因数角
$y_2$ 第二节距	$\varphi_0$ 空载功率因数角
$y_c$ 换向器节距	$\varphi_k$ 短路功率因数角
$Z$ 阻抗	$\psi$ 磁链, $E$ 和 $I$ 间的夹角
$Z_a$ 电枢总导体数	$\psi_0$ 内功率因数角
$Z_m$ 励磁阻抗	$\psi_2$ 感应电机转子的内功率因数角
$Z_k$ 短路阻抗	$\psi_d$ 直轴磁链
$Z_{1\sigma}$ 变压器一次绕组(感应电机定子)漏阻抗	$\psi_q$ 交轴磁链
$Z_{2\sigma}$ 变压器二次绕组(感应电机定子)漏阻抗	$\Omega$ 机械角速度
$Z'_{2\sigma}$ $Z_{2\sigma}$ 的归算值	$\Omega_s$ 同步机械角速度
$\alpha$ 角度,相邻两槽间的电角度(槽距角)	$\omega$ 电角速度,角频率
$\beta$ 夹角, $q$ 个线圈的总夹角	

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581999 58582371 58582488

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务与版权管理部

邮政编码 100120

### 防伪查询说明

用户购书后刮开封底防伪涂层，利用手机微信等软件扫描二维码，会跳转至防伪查询网页，获得所购图书详细信息。用户也可将防伪二维码下的20位密码按从左到右、从上到下的顺序发送短信至106695881280，免费查询所购图书真伪。

### 反盗版短信举报

编辑短信“JB,图书名称,出版社,购买地点”发送至10669588128

防伪客服电话

(010)58582300

# 目录

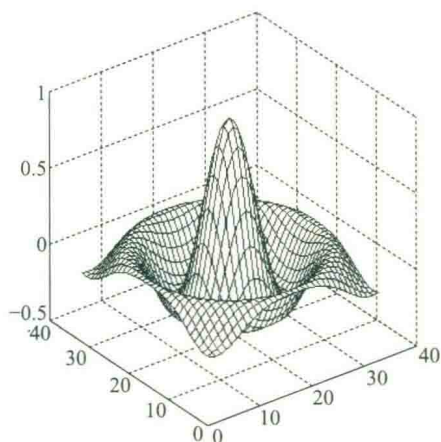
<b>第 1 章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 计算机技术的发展 .....	1
1.2 计算机辅助分析与仿真的作用 .....	2
1.3 计算机辅助分析与仿真的应用方式 .....	3
1.3.1 大计算器方式 .....	3
1.3.2 编程分析方式 .....	4
1.3.3 建模仿真方式 .....	4
1.3.4 数值计算方式 .....	5
1.4 学习建议 .....	8
<b>第 2 章 计算机辅助分析与仿真的工具和方法</b> .....	<b>9</b>
2.1 MATLAB 简介与应用 .....	9
2.1.1 MATLAB 的主要功能与应用特点 .....	10
2.1.2 MATLAB 的编程方法 .....	11
2.1.3 Simulink 的建模方法 .....	16
2.1.4 MATLAB 的屏幕图形技术 .....	21
2.2 常用的数值计算方法 .....	28
2.2.1 傅里叶变换 .....	28
2.2.2 数值插值 .....	30
2.2.3 曲线拟合 .....	32
2.2.4 代数方程求解 .....	34
2.2.5 常微分方程求解 .....	37
2.2.6 数值积分 .....	39
<b>第 3 章 电机学重点难点案例分析</b> .....	<b>42</b>
3.1 变压器部分 .....	42
3.1.1 变压器一次侧、二次侧之间没有直接连接,还能够变压的原因 .....	43
3.1.2 透彻理解理想变压器 .....	43
3.1.3 依照正方向原则,一次侧电动势和二次侧电流看着别扭的原因 .....	44
3.1.4 空载负载电流变化大,但依然是恒磁通的原因 .....	45
3.1.5 额定 50 Hz 的变压器通 60 Hz 的交流电,铁心饱和后的变化 .....	46
3.1.6 绕组匝数、铁心间隙对变压器空载电流的影响 .....	47
3.1.7 变压器参数归算的过程和结果 .....	47
3.1.8 理解相量图中的阻抗三角形 .....	48
3.1.9 采用标么值后,变压器阻抗参数的特点 .....	49
3.1.10 电压变化率数值上的特点,以及与输出电压的关系 .....	50
3.1.11 变压器典型习题分析 .....	51
3.2 交流绕组部分 .....	52
3.2.1 交流绕组和直流绕组的区别,以及对极相组的理解 .....	53
3.2.2 电动势公式中的绕组系数,以及磁通与变压器中的异同 .....	54
3.2.3 脉振磁动势和旋转磁动势的本质,以及从表达式上的区分 .....	55
3.2.4 简明易懂地理解旋转磁动势的形成条件 .....	56
3.2.5 如何理解交流绕组在交流电机中的核心作用 .....	57
3.2.6 交流绕组典型习题分析 .....	58
3.3 感应电机部分 .....	59
3.3.1 感应电机工作原理的独特之处 .....	60
3.3.2 感应电机转速的特点 .....	60
3.3.3 感应电机的机壳与直流电机的不同之处 .....	61
3.3.4 感应电机与变压器的联系与区别 .....	61

3.3.5	透彻理解感应电机的转矩转 差率曲线 .....	62	4.1.3	磁滞回线的形状 .....	84
3.3.6	感应电机电磁转矩三个公式 的对比与应用 .....	62	4.2	变压器部分 .....	86
3.3.7	感应电机典型习题分析 .....	63	4.2.1	变压器中主磁通随负载的变化 规律 .....	86
3.4	同步电机部分 .....	65	4.2.2	单相变压器的空载电流波形 .....	88
3.4.1	功角和同步电机运行状态 的关系 .....	65	4.2.3	单相变压器不同负载性质的 相量图 .....	90
3.4.2	凸极同步发电机与隐极同步 发电机的区别 .....	66	4.2.4	单相变压器的外特性与电压 变化率 .....	92
3.4.3	同步电动机自己不能起动 的原因 .....	67	4.2.5	单相变压器的效率曲线 .....	94
3.4.4	同步电机典型习题分析 .....	68	4.2.6	变压器的并联运行 .....	95
3.5	直流电机部分 .....	69	4.3	交流绕组部分 .....	97
3.5.1	直流电机的核心部件 .....	69	4.3.1	波形的合成与分解 .....	97
3.5.2	直流电机的转子叫电枢的 原因 .....	70	4.3.2	单相交流绕组磁动势的性质 .....	100
3.5.3	电枢绕组的连接,以及换向器 和电刷的位置关系 .....	70	4.3.3	多相对称交流绕组合成磁动势 的性质 .....	102
3.5.4	直流电机的电枢磁场方向,以及 对电枢的影响 .....	72	4.3.4	三相不对称交流绕组合成磁 动势的性质 .....	106
3.5.5	电动势系数和转矩系数的关系, 以及对电机性能的影响 .....	72	4.3.5	削弱谐波电动势的方法 .....	109
3.5.6	直流发电机如何变成直流电 动机,其转向如何变化 .....	73	4.4	感应电机部分 .....	110
3.5.7	快速掌握直流发电机和直流 电动机的方程 .....	74	4.4.1	笼型感应电机的运行原理 .....	110
3.5.8	如何掌握直流电动机的特性 和种类及其基本规律 .....	75	4.4.2	感应电机的 $T-s$ 曲线 .....	111
3.5.9	直流电动机被认为是特性最好 的电动机的原因 .....	76	4.4.3	电源电压和转子电阻对感应 电机特性的影响 .....	113
3.5.10	直流电机典型习题分析 .....	77	4.4.4	感应电机简化转矩公式的误差 分析 .....	115
4.1.3	磁滞回线的形状 .....	84	4.4.5	感应电机的起动过程分析 .....	117
4.2	变压器部分 .....	86	4.4.6	感应电机的变频调速 .....	118
4.2.1	变压器中主磁通随负载的变化 规律 .....	86	4.4.7	单相感应电动机的起动过程 .....	120
4.2.2	单相变压器的空载电流波形 .....	88	4.5	同步电机部分 .....	123
4.2.3	单相变压器不同负载性质的 相量图 .....	90	4.5.1	同步发电机的外特性 .....	123
4.2.4	单相变压器的外特性与电压 变化率 .....	92	4.5.2	同步发电机的功角特性 .....	125
4.2.5	单相变压器的效率曲线 .....	94	4.5.3	并网运行同步发电机的有功 功率和无功功率的调节 .....	127
4.2.6	变压器的并联运行 .....	95	4.5.4	同步发电机并网时的相量图 .....	130
4.3	交流绕组部分 .....	97	4.5.5	同步发电机并网运行的直接 接法分析 .....	131
4.3.1	波形的合成与分解 .....	97			
4.3.2	单相交流绕组磁动势的性质 .....	100			
4.3.3	多相对称交流绕组合成磁动势 的性质 .....	102			
4.3.4	三相不对称交流绕组合成磁 动势的性质 .....	106			
4.3.5	削弱谐波电动势的方法 .....	109			
4.4	感应电机部分 .....	110			
4.4.1	笼型感应电机的运行原理 .....	110			
4.4.2	感应电机的 $T-s$ 曲线 .....	111			
4.4.3	电源电压和转子电阻对感应 电机特性的影响 .....	113			
4.4.4	感应电机简化转矩公式的误差 分析 .....	115			
4.4.5	感应电机的起动过程分析 .....	117			
4.4.6	感应电机的变频调速 .....	118			
4.4.7	单相感应电动机的起动过程 .....	120			
4.5	同步电机部分 .....	123			
4.5.1	同步发电机的外特性 .....	123			
4.5.2	同步发电机的功角特性 .....	125			
4.5.3	并网运行同步发电机的有功 功率和无功功率的调节 .....	127			
4.5.4	同步发电机并网时的相量图 .....	130			
4.5.5	同步发电机并网运行的直接 接法分析 .....	131			

## 第4章 电机学常见重点难点的 仿真分析 ..... 80

4.1	磁路部分 .....	80
4.1.1	电压源供电时气隙大小对线圈 电流和磁通的影响 .....	81
4.1.2	磁化曲线的曲线拟合 .....	83

4.5.6	同步电动机的工作原理和 启动过程 .....	135	5.1	无刷直流电动机和交流永磁电机 ...	157
4.5.7	同步电动机的运行特性 .....	137	5.1.1	无刷直流电动机的换向逻辑和 运行原理 .....	158
4.6	直流电机部分 .....	138	5.1.2	无刷直流电动机的数学模型和 启动过程 .....	162
4.6.1	直流电机单叠绕组展开图 .....	138	5.1.3	无刷直流电动机的转速闭环 控制 .....	164
4.6.2	并励直流发电机的自励过程 .....	139	5.1.4	交流永磁电动机转速调节的 弱磁控制 .....	166
4.6.3	并励直流发电机的外特性 .....	141	5.2	开关磁阻电动机 .....	169
4.6.4	并励直流电动机的工作特性 .....	143	5.2.1	开关磁阻电动机的运行原理 .....	169
4.6.5	串励直流电动机的工作特性 .....	146	5.2.2	开关磁阻电动机的定子电流 波形 .....	172
4.6.6	他励直流电动机的启动过程 .....	148	附录	仿真源程序 .....	175
4.6.7	他励直流电动机的调速 .....	150	参考文献	.....	176
4.6.8	他励直流电动机的能耗制动 .....	153			
4.6.9	电车下坡时的回馈制动过程 .....	155			
第5章	常见特种电机的 Simulink 仿真 .....	157			



# 第1章 绪论

随着计算机的快速发展,计算机辅助分析和计算机仿真也越来越普遍地应用于各类专业基础课和专业课的学习中,使同学们对所研究问题的变化规律有更准确、更形象、更量化的认知,进而加深理解。

本章首先介绍了计算机辅助分析和计算机仿真的含义,并简要介绍了进行具体问题分析时最常采用的四种方式,即大计算器方式计算、编程分析、建模分析和建模数值计算。介绍的过程全部结合了电机学中的具体实例,有助于加深同学们对计算机辅助分析和仿真方式的理解。

## 1.1 计算机技术的发展

计算机的发展经历了四个阶段,即电子管计算机、晶体管计算机、集成电路计算机和大规模集成电路计算机。1946年美国宾夕法尼亚大学莫尔电工学院制造的“ENIAC”是世界上第一台电子计算机;1964年IBM公司研制成功第一台采用集成电路的计算机,标志着计算机发展进入了集成电路时代。20世纪70年代以后,采用超大规模集成电路的计算机相继问世,标志着计算机发展进入了第四代,直至今日。

随着计算机的不断发展,计算机技术也在不断发展和进步。在现代社会,计算机技术不但在航空航天以及武器系统中举足轻重,在民用领域中也是必不可少的,比如民航的管理系统。没有计算机的现代社会,其生活是无法想象的。

最重要的计算机技术,是计算机图形技术和计算机编程技术,而这二者很好地结合起来,更是会带来革命性的变革。从最初的DOS操作系统发展到现在的Windows系统,

就是个很好的例证。对科技人员来说,如何利用好计算机这个辅助工具和相关技术,获得更为准确的设计数据和设计规律,解决自己研究领域的难题,才是最为重要的工作。今天,无论是高水平的科研人员,还是正在学习知识的大学生,利用计算机作为基本工具进行科研工作或者创新设计,都是一个必不可少的基本技能。

## 1.2 计算机辅助分析与仿真的作用

计算机最突出的优点,是其高速而准确的计算能力以及庞大的数据存储能力。利用计算机作为辅助工具来分析和解决工程实际问题,就产生了计算机辅助分析(computer aided analysis,简称 CAA)、计算机辅助设计(computer aided design,简称 CAD)、计算机辅助制造(computer aided manufacture,简称 CAM)和计算机辅助测试(computer aided testing,简称 CAT)。在这些辅助应用中,计算机辅助分析是最简单的,也是效果最直观的。所谓计算机辅助分析,是指利用计算机作为辅助工具,对实际遇到的一些问题进行更简便直接而卓有成效的分析研究,得到要研究问题的本质。在过去几十年中,计算机辅助分析都要自己编制程序来完成,现在随着各类专门软件的诞生,利用专门软件进行建模计算,已经变得越来越普遍。

计算机仿真,一般叫作 Computer Emulation,或者 Simulation,是指借助计算机及相关技术,对一个复杂系统的运行过程或状态进行数字化模拟,以期得到其真实变化规律的技术。仿真,简言之,就是比较逼真的模仿。它是一种描述性技术,是一种定量分析方法,最后得到的一定是准确量化的一些指标。通常,计算机仿真都是借助现成的软件环境,通过建模和计算来完成。从这个意义上讲,计算机仿真是更高层次的计算机辅助分析。

不管是计算机辅助分析,还是计算机仿真,其主要目的都是为了更深刻地认知所研究问题的本质,一般有以下几种:

(1) 寻找问题的变化规律。已经知道了所研究问题的基本数据,但变化规律不清晰,比如铁磁材料的磁化曲线更接近什么函数关系,是指数函数还是多项式函数;一个已知波形中有哪些主要高次谐波等。

(2) 使已知的变化规律更形象直观,易于理解。已经知道了所研究问题的基本数据和变化规律,但没有形象化的直观概念,不容易掌握。比如三相对称合成交流磁动势的性质,到底是脉动的还是旋转的,感应电机转子电阻变化带来的起动转矩的变化趋势等。

(3) 把定性分析问题转化成定量计算问题,得到更确切的规律和结论。很多问题限于分析手段和知识体系,若方程中含有微分方程,在过去只能定性分析,没有数量概念的计算结果。比如感应电机空载起动,起动时间是零点几秒、几秒、还是十几秒;直流电机串电阻制动,多长时间可以完成制动过程;直流电机怎么样采用不均匀气隙,得到的气隙磁密曲线才能是正弦曲线等。

进行计算机辅助分析或仿真,一般的方法有两种。一是自己编制高级语言程序进行调试,比如 VB 或者 VC;二是借助一些现成的软件平台进行,比如本文采用的 MATLAB。现在,多数的计算机辅助分析或仿真都是采用 MATLAB,因而本文的介绍也是基于该工具进行的。

### 1.3 计算机辅助分析与仿真的应用方式

对于一般的工程问题,进行计算机辅助分析和仿真主要有大计算器、编程分析、建模分析和数值计算四种方式。

#### 1.3.1 大计算器方式

如果在研究问题过程中需要用到很多数据计算,涉及很多变量,但是计算都是循序进行的,也没有迭代循环,就像是反反复复用计算器进行数值计算一样,这时候就可以用大计算器方式来进行计算机辅助分析了。

大计算器方式,就是利用成型的计算软件平台,把要完成的手算程序直接翻译成计算语句,由软件一次性完成数据计算。常用的这类软件平台有 MathCAD、MATLAB 等。

在电机学中,大计算器方式适用于进行电磁设计计算、参数计算、性能计算等。比如单相变压器电压变化率的计算公式是  $\Delta u = I_2^* (R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2)$ , 如果需要改变不同的负载电流标么值  $I_2^*$ 、短路电阻、短路电抗的标么值  $R_k^*$  和  $X_k^*$  以及负载功率因数角  $\varphi_2$  来计算得到不同的电压变化率,那就可以编写如下语句:

```
I2=0.7;
Rk=0.02;
Xk=0.04;
Fai2=pi/3;
DetaU=I2*(Rk*cos(Fai2)+Xk*sin(Fai2))
```

该种方式最后得到的结果,就是一些计算数据,可以在计算机屏幕上直接看到。本算例的计算结果如图 1-1 所示。

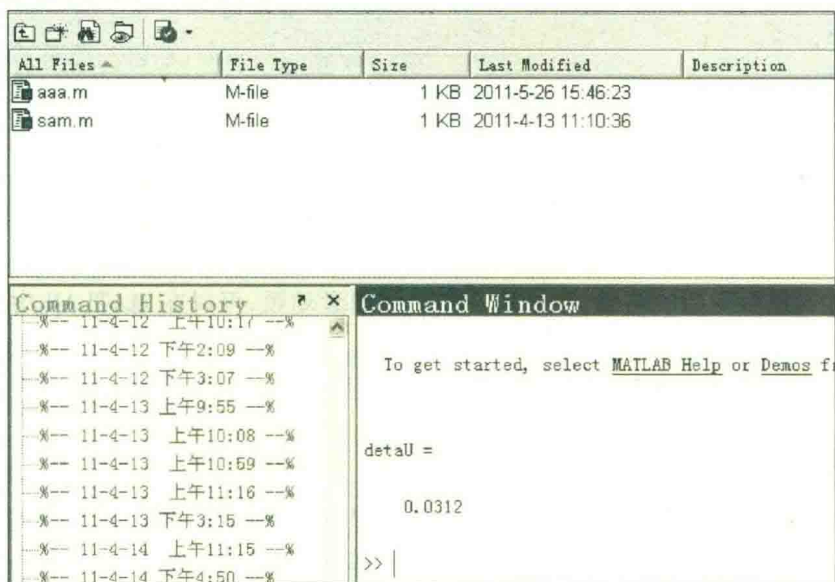


图 1-1 大计算器方式的运行结果

可以随时改变上述 4 个变量求得对应的计算结果,每改变一次数值,计算过程就相当于重新按一遍计算器。可以看出,大计算器方式是最简便且最直接的计算机辅助分析方式。显然,该种方式只适合代数运算,不适合于包括磁路计算(需要进行迭代)在内的复杂计算。

### 1.3.2 编程分析方式

如果在研究问题过程中不仅仅需要进行数据计算,还需要进行一些更复杂的工作,比如循环、迭代、屏幕图形、动画演示等,这就需要进行一个完整的软件编程,这就是计算机辅助分析的编程分析方式。

以 MATLAB 为例,编程方式就是在 MATLAB 软件平台上,通过编制各种语句来实现所需要的计算机辅助分析工作,所有的复杂工作需要编程者自己完成。如进行动画演示,需要编程者通过各种语句自己设计演示方案,画出演示目标,完成演示过程。如果是进行数值积分,那需要编程者根据标准算法自己编制相应的子程序来完成。换言之,编程方式是以操作者为主进行的。当然,经过多年的积累,在 MATLAB 中要用到的数值计算方法绝大多数都已经有了现成的子程序可用,这会在后面的第 2 章中加以介绍。

在电机学中,编程方式适用于进行所有的计算机辅助分析和仿真。例如,分析他励直流电动机起动过程中转速和电流的变化规律,根据电机学理论,他励直流电动机起动过程中对应的两个动态方程式是  $U = E_a + i_a R_a + L \frac{di_a}{dt}$  和  $T_{em} - (T_2 + T_0) = J \frac{d\Omega}{dt}$ 。这是一个比较典型的常系数微分方程组,可以利用相应的求解方法得到结果,但是他励直流电动机的内部参数(如电枢电阻、电感、电动势系数等)和外部参数(比如外加电压、额定电流、转动惯量等)都必须在程序中给定,相应的语句为:

```
Ra=0.5;
L=0.015;
Ctphi=1.53;
U=220;
J=0.7;
.....
```

该种方式最后得到的结果,往往是一些曲线或者动画,可以在 MATLAB 中直接观察看到。本例的运行结果如图 1-2 所示。

比较上面两种结果可以看出,大计算器方式实际上就是最简单的一种编程方式。

### 1.3.3 建模仿真方式

如果现在需要研究的对象是一个系统,系统中包括很多环节(如电机、放大器、控制器、反馈等),而要研究的目的是获取系统的特性尤其是动态特性,那么最合适的方式就是基于 Simulink 的计算机建模仿真方式。