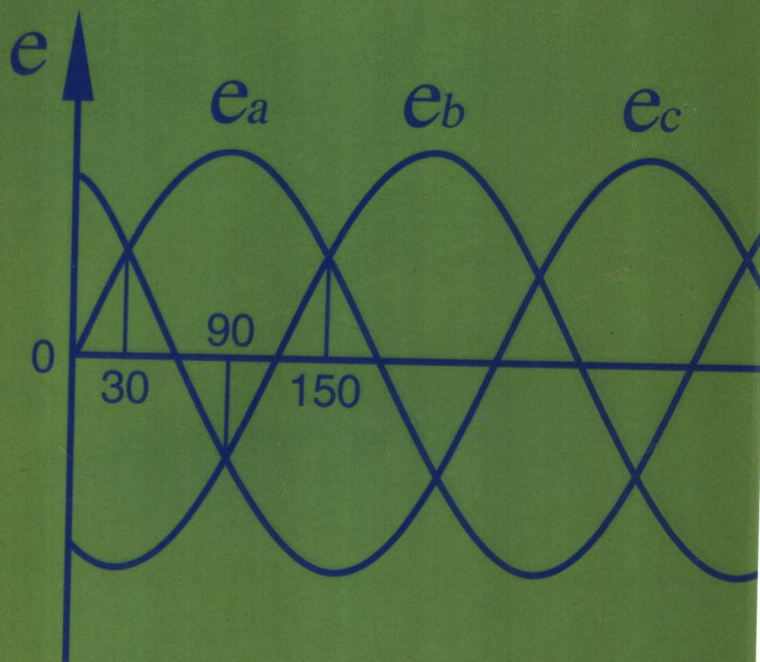


MATLAB

电机仿真 精华50例

潘晓晟 郝世勇 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

内 容 简 介

本书以实例形式向读者介绍 MATLAB 在电机仿真领域的应用。全书共计 50 个电机仿真实例,全面涵盖磁路与变压器、直流电机、异步电机及同步电机等电机技术领域,内容丰富。本书附录部分提供了一个典型的“电机仿真实验管理系统”开发范例,该系统基于 MATLAB GUI 功能设计开发,附有详细的界面设计思路和程序源代码。

本书可作为电机电气仿真专业的教学参考书,也可作为学生课程设计及毕业设计的参考资料,对于从事相关专业技术开发的工程技术人员,也极具参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 电机仿真精华 50 例/潘晓晟,郝世勇编著. —北京:电子工业出版社,2007.7
ISBN 978-7-121-04673-5

I. M… II. ①潘…②郝… III. 电机-计算机仿真-计算机辅助计算-软件包, MATLAB IV. TM3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 099693 号

策划编辑:范子瑜

责任编辑:宋兆武 王凌燕

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:294.4 千字

印 次:2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:19.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

MATLAB 问世以来, 凭借其强大的数值计算能力、出色的数据图形可视化技术及日益丰富的 SIMULINK 动态仿真模型库, 迅速占领了工程技术领域各学科的仿真高地, 成为首屈一指的计算机仿真平台。在电机电气自动化领域, 很多教师、学生和工程技术人员也把 MATLAB 作为教学、学术活动和工程设计的重要仿真工具。

鉴于 MATLAB 的庞大, 很多使用者不得不花费大量的时间和精力来学习和了解它, 甚至为此影响到自己专业的学习和研究工作。所以我们希望给读者提供比较丰富的电机仿真实例, 每个实例分析透彻, 讲解翔实, 重点突出, 均按照问题提出、问题分析、MATLAB 程序设计及源代码、SIMULINK 仿真模型、小结的思路展开, 对 MATLAB 程序源代码和 SIMULINK 仿真模型提供详细的分析讲解, 并通过小结栏目提醒读者每个实例涉及的电机和 MATLAB 重点知识及注意事项。也许这样的实例正是您所需要的, 您完全可以拿来就用, 或者稍加修改, 这样您可以专注于自己的专业, 减少不必要的精力浪费。即使不能这样, 也希望通过这些实例的学习, 让读者举一反三、触类旁通。作为一本介绍 MATLAB 电机仿真的图书, 本书并不需要读者具有系统深厚的 MATLAB 功底, 希望借助于本书实例, 读者能够熟悉必要的 MATLAB 知识, 这也是编者的初衷。

本书基于 MATLAB 6.5 平台编写, 适合 MATLAB 6.5 及以上版本。

全书共分五个部分:

- **磁路与变压器** 讲解磁化曲线、磁滞回线绘制、磁路电流畸变分析, 变压器空载运行、负载运行、空载合闸、突然短路、稳态计算等的仿真实例。

- **直流电机** 讲解直流发电机的自激、空载特性、外特性、调整特性分析, 发电机突然短路, 直流电机机械特性、转矩特性、起动、调速与制动的仿真实例。

- **异步电机** 内容包括三相异步电机的机械特性、 $\alpha\beta 0$ 系统异步电机仿真模型、 $dq 0$ 系统异步电机仿真模型、各种起动方法、调速方法、制动方法仿真、矢量控制调速系统仿真、三相异步发电机仿真。

- **同步电机** 内容包括三相同步发电机 abc 系统仿真模型、 $dq 0$ 系统仿真模型、 $\alpha\beta 0$ 系统仿真模型、 $dq\beta 0$ 系统仿真模型, 三相同步发电机空载建立电压、突然短路、接整流负载时的电压畸变、六相交直流混合供电同步发电机仿真。

- **电机仿真实验系统** 介绍仿真实验系统的界面设计思路和流程、回调函数编写。

本书主要面向从事电机电气自动化教学和科研活动的教师、学生及从事电机电气设计的工程技术人员, 特别适合作为电机电气仿真教学参考书、电机电气类专业学生的课程设计辅助教材和毕业设计参考资料, 对于从事相关专业技术开发的工程技术人员, 本书也极具参考价值。

参与本书编写工作的还有王崇斌、李树峰、崔高仑、钟小平。

本书写作过程中参考了大量文献, 既有 MATLAB 方面的专著, 也有电机仿真领域的精华, 专家学者的智慧使我受益匪浅; 王海滨同学为电机仿真试验系统的设计付出了辛勤劳动。借此

机会向他们表示衷心的感谢。所有参考文献附后，如有疏漏，敬请谅解。

感谢电子工业出版社的编辑老师为本书付出的心血，感谢朋友们的关心和帮助，感谢家人的理解和支持。

因为学识有限，本书疏漏之处在所难免，恳请各位专家和读者朋友指正。

作者的电子信箱为 xspanpan@163.com。

编 者
2007 年 1 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应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，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

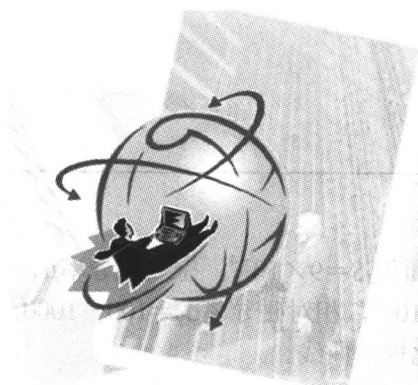
电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

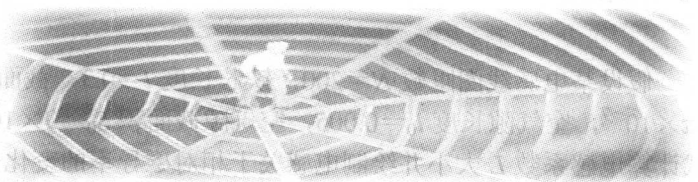
目 录

磁路与变压器篇	(1)
【实例 1】电感系数计算	(2)
【实例 2】磁性材料的磁化曲线	(4)
【实例 3】磁性材料的磁滞回线	(6)
【实例 4】交流磁路电流畸变	(8)
【实例 5】变压器空载运行	(10)
【实例 6】变压器负载运行	(12)
【实例 7】变压器空载合闸	(15)
【实例 8】变压器副边突然短路	(17)
直流电机篇	(20)
【实例 9】并励直流发电机的自激	(21)
【实例 10】直流发电机的空载特性	(25)
【实例 11】直流发电机的外特性	(27)
【实例 12】直流发电机的调整特性	(30)
【实例 13】他励直流发电机的突然短路	(32)
【实例 14】直流电动机的转矩特性	(34)
【实例 15】直流电动机的机械特性	(36)
【实例 16】直流电动机直接起动	(38)
【实例 17】直流电动机分级起动	(41)
【实例 18】直流电动机软起动	(44)
【实例 19】直流电动机调节电枢电压调速	(47)
【实例 20】直流电动机调节励磁电流调速	(49)
【实例 21】直流电动机电枢回路串电阻调速	(51)
【实例 22】晶闸管—直流电动机开环调速	(53)
【实例 23】晶闸管—直流电动机闭环—静差调速系统	(55)
【实例 24】晶闸管—直流电动机转速、电流双闭环调速—无静差调速系统	(57)
【实例 25】直流电动机能耗制动	(59)
【实例 26】直流电动机反接制动	(62)
【实例 27】直流电动机反馈制动	(63)
异步电机篇	(65)
【实例 28】三相异步电机的机械特性	(66)
【实例 29】基于 $\alpha\beta 0$ 数学模型的三相异步电机仿真模型及其仿真	(68)
【实例 30】基于 $dq 0$ 数学模型的三相异步电机仿真模型及其仿真	(74)
【实例 31】三相异步电机直接起动仿真模型	(78)
【实例 32】三相异步电机串电抗器起动仿真模型	(80)

【实例 33】三相异步电机变压器起动仿真模型	(82)
【实例 34】三相异步电机转子绕组串电阻起动仿真模型	(84)
【实例 35】三相异步电机调压调速仿真模型	(85)
【实例 36】三相异步电机变频调速仿真模型	(87)
【实例 37】三相异步电机转子绕组串电阻调速仿真模型	(89)
【实例 38】三相异步电机反转仿真模型	(90)
【实例 39】三相异步电机自然制动仿真模型	(92)
【实例 40】三相异步电机能耗制动仿真模型	(93)
【实例 41】三相异步电机反接制动（与反转完全相同）仿真模型	(95)
【实例 42】三相异步电机反馈制动（制动后负载为负值）仿真模型	(97)
【实例 43】三相异步电机矢量控制调速系统仿真模型	(98)
【实例 44】三相异步发电机仿真	(106)
同步电机篇	(112)
【实例 45】三相同步发电机空载建立电压的仿真程序及其仿真	(113)
【实例 46】三相同步发电机三相突然短路仿真程序及其仿真	(116)
【实例 47】同步发电机转子绕组短路，定子绕组突加对称电压仿真程序及仿真	(119)
【实例 48】同步发电机 dq β 0 系统仿真程序及不对称问题仿真	(123)
【实例 49】三相同步发电机接整流负载时交流电压谐波仿真	(131)
【实例 50】六相交直流混合供电同步发电机仿真	(138)
附录 A 基于 GUI 功能设计电机仿真实验系统	(170)
参考文献	(176)



磁路与变压器篇



磁路与变压器是电机研究的基本内容之一。

在电机内部，磁路起引导磁通的作用，构成电机磁路的主要材料是铁磁性物质，对磁性材料、磁路及其特性的研究，是进一步研究电机的基础。磁路及磁性材料的基本特性包括磁化曲线、磁滞回线、自感系数，以及电磁感应过程中由于非线性引起的电流畸变等。

变压器是一种静止的电气设备，因为原、副边线圈匝数不同，通过电磁感应关系，把一种电压数值转换成另外一种电压数值。变压器内部，既有磁路问题，也有电路问题，而且彼此之间还有耦合关系。为了研究方便，通常将其转化为等效电路，并且用一组电路方程来描述。变压器的特性和工作过程的分析，包括空载特性、负载特性、突然合闸、突然短路等都以等效电路和电路方程为基础。

本篇运用 MATLAB 来研究和解决上述问题。涉及的 MATLAB 仿真方法有曲线拟合、数值计算、程序设计、SIMULINK 动态仿真等。



【实例 1】电感系数计算

假设某电感线圈匝数 $N=200$ ，铁芯长度 $l=0.3$ ，截面积 $S=9 \times 10^{-4}$ ，空气磁导率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ ，空气隙长度 $l_0=0.005$ ，空气隙截面积 $S_0=9 \times 10^{-4}$ ，相对磁导率 $\mu_r=100 \sim 1000$ ，试计算电感系数 L 大小并绘制电感关于相对磁导率的变化规律曲线。

1. 问题分析

计算电感系数的两个基本公式如下：

磁阻

$$R_m = l / (\mu_r \mu_0 S)$$

电感系数

$$L = N^2 / R_m$$

将已知条件代入两个公式即可求出电感系数，根据电感系数的数学表达式可以画出电感系数关于相对磁导率的变化规律曲线。

2. MATLAB 程序设计及程序清单

本例采用 M 脚本文件 (Script file) 形式进行 MATLAB 程序设计，程序流程包括元件参数赋值、电感系数计算、电感关于相对磁导率的变化规律曲线绘制三个步骤。

在 MATLAB 主窗口单击【File\New】新建一个 .m 文件，并命名为 inductance.m，然后编写电感系数计算的主程序并保存在 Matlab\work 目录下。

返回到 MATLAB 主命令窗口，输入文件名 inductance，就可以看到电感关于相对磁导率的变化规律曲线，如实例图 1-1 所示。

MATLAB 程序文件 inductance.m 如下：

```
% 下面两条语句分别用来清空 MATLAB 主程序窗口和变量空间的变量，前者使窗口变的
% 干净，后者避免本程序中的变量名与变量空间里面已有的变量名发生冲突，造成计算
% 错误。在很多程序中经常可以见到，初学者应该注意。
clc
clear
% 以下赋初值，其中空气磁导率 mu0，相对磁导率 mur，线圈匝数 N，铁芯长度和面积
% 分别是 l 和 S，空气隙的长度和面积分别是 l0 和 S0
mu0=pi*4e-7;
N=400;l=0.3;l0=0.0005;S=9e-4;S0=9e-4;
% 以下计算电感系数
Rgas=l0/(mu0*S0);
```

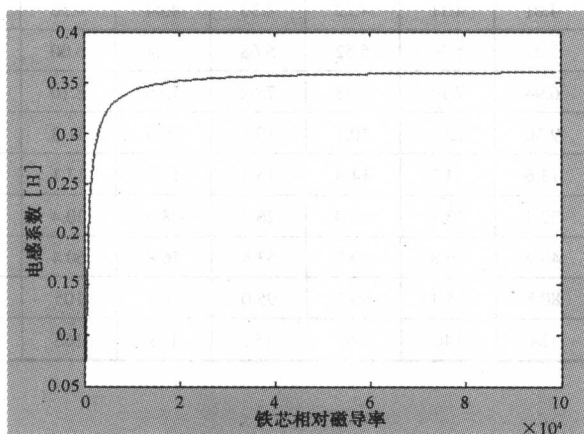
```

for n=1:100;
    mur(n)=100+(100000-100)*(n-1)/100;
    R(n)=l/(mur(n)*mu0*S);
    Rtotal=Rgas+R(n);
    L(n)=N^2/Rtotal;
end
% 以下绘制电感系数关于相对磁导率的变化规律曲线。需要说明的是，下面这条 plot
% 语句不能写成 plot(mur(n),L)，否则只能绘制相对磁导率为 100 时的电感数值，因
% 为此时 for 循环已经结束，n=100，请初学者注意
plot(mur,L)
% 以下设置坐标轴标签
xlabel('铁芯相对磁导率')
ylabel('电感系数 [H] ')

```

3. 仿真结果

电感关于相对磁导率的变化规律曲线如实例图 1-1 所示。



实例图 1-1 电感关于相对磁导率的变化规律曲线

小结：考虑到电感系数本身随着铁芯相对磁导率的变化而变化，所以程序中并没有直接给出电感系数的数值计算语句。如果想观察某个相对磁导率下电感系数的数值，可以在程序中增加这样的语句，比如，在程序中 end 语句之后，加上 L(100)，运行程序后就可以得到相对磁导率为 100 时的电感系数值，当然该语句也可以加在 end 语句之前，不过效果是不一样的。如果想观察所有相对磁导率下的电感数值，应该如何操作，请读者自行添加语句进行试验。



【实例 2】磁性材料的磁化曲线

某种磁性材料的磁化数据如实例表 2-1 所示,用曲线拟合的方法绘出其磁化曲线(50Hz, 0.5mm, D_{23})。

实例表 2-1 某种磁性材料的磁化数据 (50Hz, 0.5mm, D_{23})

B(T)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	B(T)
0.4	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	0.4
0.5	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66	1.69	1.71	1.74	1.76	1.78	0.5
0.6	1.81	1.84	1.86	1.89	1.91	1.94	1.97	2.00	2.03	2.06	0.6
0.7	2.10	2.13	2.16	2.20	2.24	2.28	2.32	2.36	2.40	2.45	0.7
0.8	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.76	2.81	2.87	2.93	2.99	0.8
0.9	3.06	3.13	3.19	3.26	3.33	3.41	3.49	3.57	3.65	3.74	0.9
1.0	3.83	3.92	4.01	4.11	4.22	4.33	4.44	4.56	4.67	4.80	1.0
1.1	4.93	5.07	5.21	5.36	5.52	5.68	5.84	6.00	6.16	6.33	1.1
1.2	6.52	6.72	6.94	7.16	7.38	7.62	7.86	8.10	8.36	8.62	1.2
1.3	8.90	9.20	9.50	9.80	10.1	10.5	10.9	11.3	11.7	12.1	1.3
1.4	12.6	13.1	13.6	14.2	14.8	15.5	16.3	17.1	18.1	19.1	1.4
1.5	20.1	21.2	22.4	23.7	25.0	26.7	28.5	30.4	32.6	35.1	1.5
1.6	37.8	40.7	43.7	46.8	50.0	53.4	56.8	60.4	64.0	67.8	1.6
1.7	72.0	76.4	80.8	85.4	90.2	95.0	100	105	110	116	1.7
1.8	122	128	134	140	146	152	158	165	172	180	1.8

1. 问题分析

磁化曲线是磁性材料的重要分析手段,通常根据实验数据通过曲线拟合得到。这里采用 MATLAB 的拟合指令 `polyfit` 进行磁化曲线拟合并画出拟合曲线。

2. MATLAB 程序设计及程序清单

本例采用 M 脚本文件 (Script file) 形式进行 MATLAB 程序设计,程序包括元件参数赋值、拟合计算、曲线绘制三个步骤。

MATLAB 程序 `core_relation-poly.m` 如下:

```
% 磁化曲线拟合(core_relation-poly)
clc
clear
% 输入磁场强度和磁感应强度的基本数据
% 磁场强度用 Hdata 表示
```

```

% 磁感应强度用 Bdata 表示
Hdata = [ 1.38, 1.40, 1.42, 1.44, 1.46, 1.48, 1.50, 1.52, 1.54, 1.56,...
          1.58, 1.60, 1.62, 1.64, 1.66, 1.69, 1.71, 1.74, 1.76, 1.78,...
          1.81, 1.84, 1.86, 1.89, 1.91, 1.94, 1.97, 2.00, 2.03, 2.06,...
          2.10, 2.13, 2.16, 2.20, 2.24, 2.28, 2.32, 2.36, 2.40, 2.45,...
          2.50, 2.55, 2.60, 2.65, 2.70, 2.76, 2.81, 2.87, 2.93, 2.99,...
          3.06, 3.13, 3.19, 3.26, 3.33, 3.41, 3.49, 3.57, 3.65, 3.74,...
          3.83, 3.92, 4.01, 4.11, 4.22, 4.33, 4.44, 4.56, 4.67, 4.80,...
          4.93, 5.07, 5.21, 5.36, 5.52, 5.68, 5.84, 6.00, 6.16, 6.33,...
          6.52, 6.72, 6.94, 7.16, 7.38, 7.62, 7.86, 8.10, 8.36, 8.62,...
          8.90, 9.20, 9.50, 9.80, 10.1, 10.5, 10.9, 11.3, 11.7, 12.1,...
          12.6, 13.1, 13.6, 14.2, 14.8, 15.5, 16.3, 17.1, 18.1, 19.1,...
          20.1, 21.2, 22.4, 23.7, 25.0, 26.7, 28.5, 30.4, 32.6, 35.1,...
          37.8, 40.7, 43.7, 46.8, 50.0, 53.4, 56.8, 60.4, 64.0, 67.8];

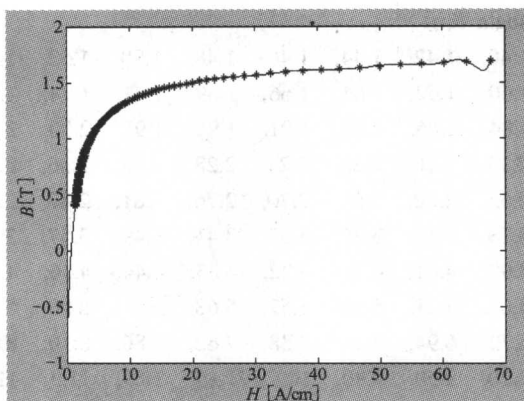
Bdata=0.40:0.01:1.69;

% 计算数组长度
len=length(Hdata)
% 提取数组最大值
Hmax=Hdata(len);
% 计算多项式拟合系数 a
a=polyfit(Hdata,Bdata,13);
% 拟合数据提取
for n=1:151
    Hfit(n)=Hmax*(n-1)/150;
    Bfit(n)=a(1)*Hfit(n)^13+a(2)*Hfit(n)^12+a(3)*Hfit(n)^11+a(4)*Hfit(n)^10+a(5)*Hfit(n)^9+a(6)*
    Hfit(n)^8+a(7)*Hfit(n)^7+a(8)*Hfit(n)^6+a(9)*Hfit(n)^5+a(10)*Hfit(n)^4+a(11)*Hfit(n)^3+a(12)*Hfit(n)^2+
    a(13)*Hfit(n)+a(14);
end
% 绘图
% 对原数据描点绘图
plot(Hdata,Bdata,'*')
hold
% 绘制多项式拟合曲线
plot(Hfit,Bfit)
hold
xlabel('H[A/cm]')
ylabel('B[T]')

```

3. 仿真结果

磁性材料的磁化曲线如实例图 2-1 所示。



实例图 2-1 磁性材料的磁化曲线

小结：在 MATLAB 中进行曲线拟合，并不意味着拟合阶数越高越好。如果拟合次数太低而数据较多，则拟合效果较差，拟合比较粗糙，但是拟合的速度相对较快。为了追求拟合效果，经常会考虑增加拟合次数，这样就要付出运算速度慢的代价，在待拟合数据比较多时，问题会更加突出。不仅如此，如果拟合阶数过高，还有可能导致数据噪声影响，造成拟合出错。建议读者可以由低到高逐渐增加拟合次数同时逐步观察效果。



【实例 3】磁性材料的磁滞回线

对某种磁性材料反复磁化，得到的数据如实例表 3-1 所示，试画出其磁滞回线。

实例表 3-1 某种磁性材料的磁化数据 (50Hz, 0.5mm, D₂₃)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.95	0.9	0.8
H	48	52	58	73	85	103	135	193	80	42	2
B	0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-0.95	-0.9	-0.8
H	-48	-52	-58	-73	-85	-103	-135	-193	-80	-42	-2

1. 问题分析

磁滞回线同样可以反映磁性材料的基本性质，但是由于磁滞回线是一条包络线，无法进行简单的曲线拟合。这里采用 MATLAB 的绘图指令 plot 画出磁滞曲线，如实例图 3-1 所示。

2. MATLAB 程序设计及程序清单

本例采用 M 脚本文件 (Script file) 形式进行 MATLAB 程序设计，程序包括元件参数赋值、曲线绘制两个步骤。

MATLAB 程序 core_relation-poly.m 如下：

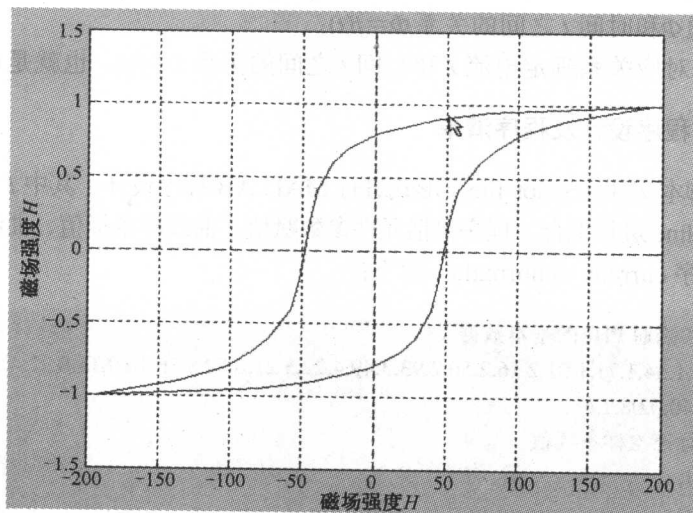
```

% 输入磁场强度和磁感应强度的基本数据
% 磁场强度用 Hdata 表示
% 磁感应强度用 Bdata 表示
Bdata=[0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 0.95, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.4, 0.2, 0, -0.2, -0.4,
-0.6, -0.7, -0.8, -0.9, -1.0, -0.95, -0.9, -0.8, -0.7, -0.6, -0.4, -0.2, 0];
Hdata=[48, 52, 58, 73, 85, 103, 135, 193, 80, 42, 2, -18, -29, -40, -45, -48, -52,
-58, -73, -85, -103, -135, -193, -80, -42, -2, 18, 29, 40, 45, 48];
% 绘制磁滞回线
plot(Hdata,Bdata)
hold on
% 以下绘制 X 轴坐标线
plot([-200,200],[0,0],'-')
hold on
% 以下绘制 Y 轴坐标线
plot([0,0],[-1.5,1.5],'-')
grid on

```

3. 仿真结果

某种磁性材料的磁滞回线如实例图 3-1 所示。



实例图 3-1 某种磁性材料的磁滞回线

小结：本例磁滞回线的绘制没有采用曲线拟合的方法，这是因为磁滞回线是一条包络线，无法直接进行曲线拟合。这也从另外一个角度告诉我们，曲线拟合更适合于进行单方向发展的数据拟合，否则很容易造成拟合过程的混乱，这也是曲线拟合语句 `polyfit` 的局限所在。而绘图语句 `poly` 则不存在这样的问题。如果确实需要进行曲线拟合，只能采用分段拟合的方式，即把磁滞回线分成两部分，然后分别进行拟合，具体的拟合方法与《实例 2》完全相同，感兴趣的读者不妨一试。



【实例 4】交流磁路电流畸变

某交流磁路磁化数据如实例表 4-1 所示, 假设磁路中磁通按照正弦规律变化, 试分析线圈中电流的变化规律。

实例表 4-1 某交流磁路磁化数据 (50Hz, 0.5mm, D₂₃)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
I	1.38	1.54	1.71	1.91	2.16	2.50	2.93	3.49	4.22	5.21	6.52	8.36	10.9	14.8	22.4	37.8	64.0
ψ	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72	0.80	0.88	0.96	1.04	1.12	1.20	1.28	1.36	1.44	1.52	1.60	1.68

1. 问题分析

在交流铁芯线圈中, 当交变磁通按照正弦规律变化时, 受到磁路饱和的影响, 线圈中的电流会发生畸变, 并成为尖顶波, 这就是所谓的交流磁路电流畸变。要分析其中电流的变化规律, 应该按照以下思路进行:

- (1) 分析磁通 Φ (在程序中用 PHI 表示) 与电流 I 之间的关系 $\Phi=f(I)$;
- (2) 分析磁通 Φ 和时间 t 之间的关系 $\Phi=f(t)$;
- (3) 通过上述对应关系确定电流 I 和时间 t 之间的关系 $I=f(t)$, 也就是电流的畸变规律。

2. MATLAB 程序设计及程序清单

本例采用 M 脚本文件 (Script file) 形式进行 MATLAB 程序设计, 其中 I 和 Φ 之间的关系采用样条插值语句 spline 进行拟合。程序包括元件参数赋值、曲线样条插值、曲线绘制三个步骤。

MATLAB 程序 current_abnormal.m 如下:

```
% 电流 I 和磁通 PHI 的基本数据
Idata=[1.38,1.54,1.71,1.91,2.16,2.50,2.93,3.49,4.22,5.21,6.52,8.36,10.9,14.8,22.4,37.8,64.0];
PHIdata=0.40:0.08:1.68;
% 下面进行三次样条插值
t=0:0.001:pi;
PHI=2*sin(t);
I=spline(PHIdata,Idata,PHI);
% 上面一条语句是根据样点数据求 I 对应的样条插值, 说得具体一点, 就是根据样点数
% 据 (PHIdata,Idata), 求对应于 PHI 数据的插值 I。还要指出一点, 三次样条插值属于
% 插值精度很高的方法, 同时运算速度也比较慢, 对计算机速度要求较高
% 绘图
% 绘制磁通随时间变化规律
subplot(1,2,1)
plot(t,PHI)
hold
```

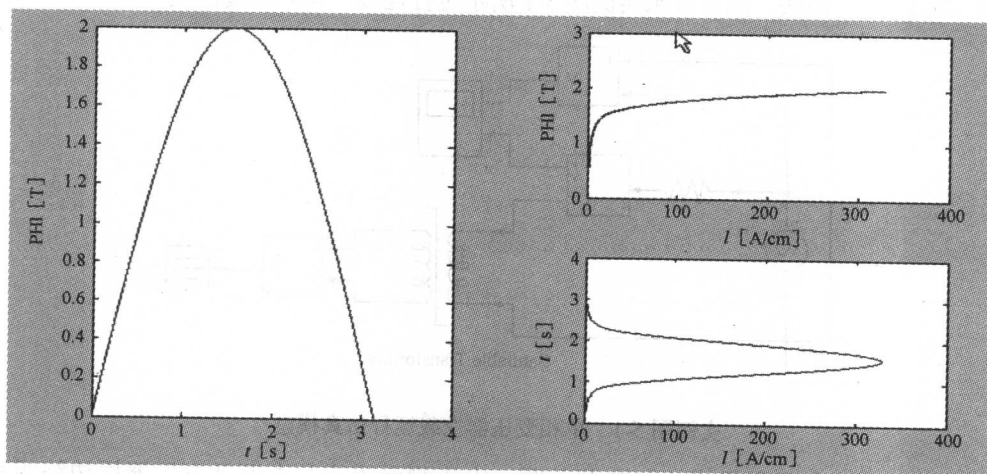
```

xlabel('t[s]')
ylabel('PHI[T]')
% 绘制磁通随电流变化规律
subplot(2,2,2)
plot(I,PHI)
hold
axis([0 400 0 3])
xlabel('I[A/cm]')
ylabel('PHI[T]')
% 绘制电流随时间变化规律
subplot(2,2,4)
plot(I,t)
axis([0 400 0 4])
xlabel('I[A/cm]')
ylabel('t[s]')

```

3. 仿真结果

交流磁路电流畸变曲线如实例图 4-1 所示。



实例图 4-1 交流磁路电流畸变

小结：本例中的曲线绘制属于典型的多子图绘制，基本语句是 `subplot(m,n,k)`。该语句是指，整个图形窗口将有 $(m \times n)$ 幅子图， k 是某一幅子图的编号，子图的编号顺序为自左至右，自上而下。如实例图 4-1 所示，左边大图为 $(1,2,1)$ ，即按照 (1×2) 的结构编图，编号为 1。右上方图为 $(2,2,2)$ ，即按照 (2×2) 的结构编图，编号为 2。顺便指出，在同一个图形窗口，可以按照两种不同结构先后绘图，即可以先行绘制 1×2 的图形，再绘制 2×2 的图形，但是注意后面绘制的图形不能与前面绘制的图形发生位置重叠，否则就会出现覆盖现象，这是多子图绘制时需要注意的一点。



【实例 5】变压器空载运行

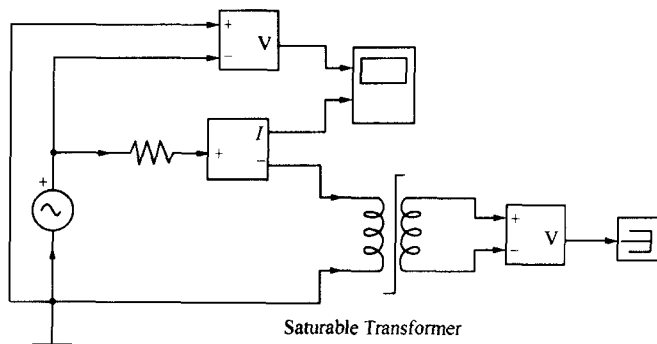
单相变压器空载运行，观察空载电流的大小和励磁电流的畸变情况。

1. 问题分析

单相变压器空载运行时，原边电流主要用来产生主磁场，而电路损耗和铁芯损耗很小，因此即使外加电压很大，空载电流仍然很小。同时由于受到磁路饱和的影响，在外加电压为正弦规律变化时，原边电流将畸变为尖顶波。运用 MATLAB\SIMULINK 建立仿真模型，可以很容易观察到这些现象。

2. SIMULINK 仿真模型

新建一个 SIMULINK 仿真窗口，依次选择饱和单相变压器（Saturable Transformer）、交流电压源（AC Voltage Source）、电压测量（Voltage Measurement）、电流测量（Current Measurement）、示波器（Scope）等模块，然后按照实例图 5-1 所示进行连接，建立仿真模型。



实例图 5-1 单相变压器空载运行仿真模型

由上图可见，电压测量模块与电源并联，电流测量模块与电源及变压器原边绕组串联，然后将测量模块的输出分别送至示波器，以观察波形。

变压器副边接一个电压测量模块（相当于开路），但并不需要接示波器。

双击交流电源、单相变压器、示波器等模块，可以进行相应参数设置。其中单相变压器的参数设置比较复杂，涉及供电功率、频率、原边电压、漏电阻、漏电抗、副边电压、漏电阻、漏电抗、变压器磁化曲线（数值）、励磁电阻、剩磁等，现给出其参数设置如实例图 5-2 所示。