

# 基于 MATLAB 下的 PID 控制仿真

白继平, 许德辉

(浙江交通职业技术学院, 浙江 杭州 311112)

**摘 要:** 自动化船舶的机舱设备热工参数的定值控制系统多采用 P、I、D 的组合控制。文中通过 MATLAB 软件用于直伺服电机对单位阶跃输入的 PID 控制进行了动态仿真, 显示了不同作用组合和不同增益设置时的动态过程, 为系统控制规律的选择和参数设定提供了依据。

**关键词:** 船舶、舰船工程; 机舱自动化; 研究; MATLAB; PID

**中图分类号:** U664.821 **文献标识码:** A

## MATLAB-Based PID Control Simulation

BAI Ji-ping, XU De-hui

(Zhejiang Vocational and Technical Institute of Transportation, Hangzhou 311112, China)

**Abstract:** The PID combined control is adopted mostly in the constant control system of thermodynamic parameters for automotive engine room equipment. A dynamic simulation of step input PID control was conducted by applying MATLAB in a DC motor, which displays the dynamic process under different function compositions and different gain setups and provides a base for system control mode selection and parameters setting.

**Key words:** Ship, Navy vessel engineering; Engine room automation; Research; MATLAB; PID

船舶机舱自动化中, 热工参数的自动控制占有很大的比例, 这些控制多采用 P、I、D 的组合。通常情况下, 对系统的动态过程利用微分方程经拉普拉斯变换导出时间函数, 可得到输出量的时间函数, 但要得到系统的动态响应, 特别是增益变化时的动态响应曲线, 其计算量庞大。因而在一般情况下对控制结果很难得到精确的预见。

矩阵实验室 (Matrix Laboratory, MATLAB) 软件是一个适用于科学计算和工程应用的数学软件系统, 历经 20 多年的发展, 现已是 IEEE 组织认可的最优化的科技应用软件。该软件具有以下特点: 数值运算功能强大; 编程环境简单; 数据可视化功能强; 丰富的程序工具箱; 可扩展性能强等。

本文以工程控制中常用的直流伺服电机的自动控制为例, 演示 MATLAB 编程在自动控制系统动态仿真中的应用。

## 1 直流伺服电机模型

### 1.1 直流伺服电机的物理模型<sup>[1]</sup>

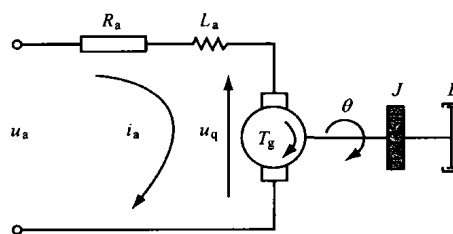


图 1 直流伺服电机的物理模型

$u_a$ —电枢输入电压(V)  $R_a$ —电枢电阻( $\Omega$ )  $L_a$ —电枢电感(H)  
 $u_q$ —感应电动势(V)  $T_g$ —电机电磁转矩 ( $N \cdot m$ )  $J$ —转动惯量 ( $kg \cdot m^2$ )  $B$ —粘性阻尼系数( $N \cdot m \cdot s$ )  $i_g$ —流过电枢的电流(A)  
 $\theta$ —电机输出的转角(rad)

本文所采用的直流伺服电机的物理模型和参数如图 1 所示。

### 1.2 直流电机的数学模型

#### 1.2.1 基本方程

根据基尔霍夫定律和牛顿第二定律对图 1 所示的电机列基本方程:

$$\left. \begin{aligned} u_a - u_q &= i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \\ T_g &= J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \\ T_g &= i_a K_t \\ u_q &= K_e \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $K_t$  为电机的转矩常数 ( $N \cdot m/A$ );  $K_e$  为感应电动势常数 ( $V \cdot s/rad$ )。

### 1.2.2 电机的传递函数

对式(1)进行拉普拉斯变换,得:

$$\left. \begin{aligned} U_a(s) - U_q(s) &= I_a(s) \cdot R_a + L_a s \cdot I_a(s) \\ T_g(s) &= J s^2 \cdot \theta(s) + B s \cdot \theta(s) \\ T_g(s) &= I_a(s) \cdot K_t \\ U_q(s) &= K_e s \cdot \theta(s) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

设  $\Omega(s) = s \cdot \theta(s)$ , 则图 1 所示的伺服直流电机模型的方块图如图 2 所示。

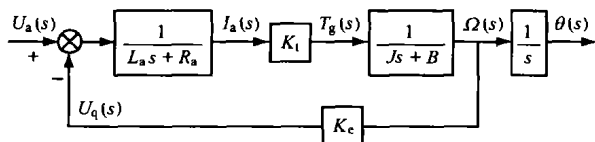


图 2 直流伺服电机模型方块图

消去方程组(2)的中间变量,整理得

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t}{[(L_a s + R_a)(J s + B) + K_t K_e] s}$$

即  $G(s)$  为图 2 所示系统的开环传递函数。

设图 2 中的系统参数<sup>[2]</sup>如下:  $J = 3.23 \text{ m} \cdot \text{g} \cdot \text{m}^2$ ,  $B = 3.51 \mu\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ ,  $R_a = 4 \Omega$ ,  $L_a = 2.75 \mu\text{H}$ ,  $K_t = K_e = 0.03 \text{ (N} \cdot \text{m)A}$ 。

## 2 MATLAB 仿真<sup>[3]</sup>

利用 MATLAB 软件对自动控制系统进行仿真的方法有多种,本文介绍一种比较简单的方法 Mfile 方法,即新创建一个 M 程序文件,然后将其在 MATLAB Windows 主界面内运行, MATLAB 软件会自动绘制出系统对外界输入的响应曲线。

### 2.1 仿真系统的要求

图 1 所示的直流伺服电机的电枢在外加控制电压前是停转状态的,当电枢外加阶跃电压后,由于电枢绕组有电感,电枢电流  $i_a$  不能突然增加,有一个电气过程,响应的电磁转矩  $T_g$  的增加也有一个过程。但是,为了满足自动控制系统快速响应的要求,直流伺服电机的转速变化应能够迅速跟上控制信号

的变化。所以本文所述系统(图 2)要求在电压输入端输入单位阶跃电压(1 V)后,直流伺服电机的转轴应能输出 1 rad 转角,且该系统应同时满足下列要求:系统调整时间  $t_s < 40 \text{ ms}$ ,最大超调量  $M_p < 15\%$ ,系统稳态误差  $e_{ss} = 0$ 。

### 2.2 系统阶跃输入响应<sup>[4,5]</sup>仿真

首先创建一个 MATLAB 文件 motor.m,即将直流电机的传递函数转换为 MATLAB 可执行的命令。文件 motor.m 的内容如下:

```
J = 3.23E-6;
B = 3.51E-6;
R_a = 4;
L_a = 2.75E-6;
K_t = 0.03;
num = K_t;
den = [(J * L_a) ((J * R_a) + (L_a * B)) ((B * R_a) + K_t * K_e) 0];
t = 0:0.001:0.2;
step(num, den, t);
```

现在,在 MATLAB 的主界面中输入 motor 后,就可以得到直流伺服电机对单位阶跃输入的响应曲线,如图 3 所示。

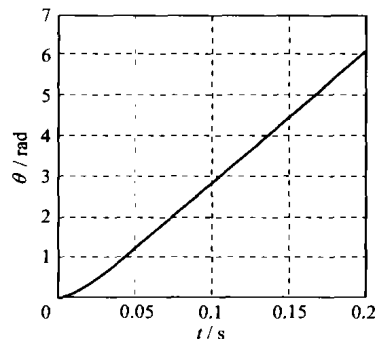


图 3 开环系统的阶跃响应

图 3 显示的结果是图 4 所示开环系统对单位阶跃输入的响应,即直流伺服电机输入 1 V 单位阶跃电压时,电机的转轴输出呈直线性上升。这个分析结果表明,该系统没有达到预期的设计要求。

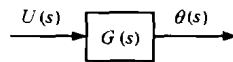


图 4 开环系统对单位阶跃输入的响应

### 2.3 PID 校正

为了使系统能够达到设计要求,可以在图 4 的前向通道上设置一个控制构成闭环系统来校正直流伺服电机,如图 5 所示。

#### 2.3.1 比例控制校正

为能在要求的 40 ms 内达到设定的角位移,比

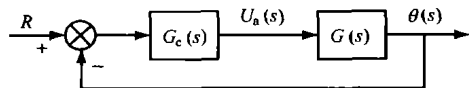
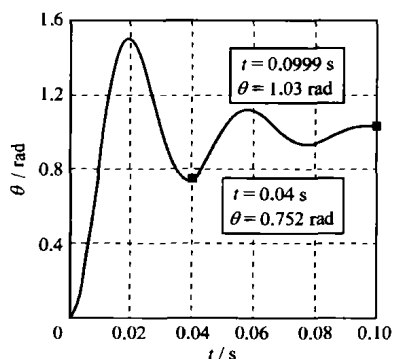


图5 PID校正

例增益  $K_p$  应尽可能大,以提高比例作用的强度,但必须同时考虑系统的稳定性。采用单纯的比例控制,其调整时间和超调量是一对矛盾,无法同时满足,要缩短调整时间, $K_p$  要加大,但超调量也同时加大了。经过多次参数选择,当  $K_p = 10$  时,阶跃响应曲线较为理想,呈现接近 0.75 衰减率的振荡过程。

在图 5 的前向通道  $G(s)$  前加一个比例控制器,即  $G_c(s) = K_p$ ,令  $K_p = 10$ ,则 motor 需作如下修改:

```
...
Kp = 10;
numcf = [Kp];
dencf = [1];
numf = conv(numcf,num);
denf = conv(dencf,den);
[numc,denc] = cloop(numf,denf);
t = 0:0.001:0.04;
step(numc,denc,t);
```

图6 系统阶跃响应( $K_p = 10$ )

在 MATLAB 界面下运行 motor 得到图 6,由图可知,此时的超调量为 50.6%,40 ms 时的稳态误差为 0.248,均不能满足设计要求,特别是调节过程,100 ms 后才能逐步进入稳态。

经过上述分析,对图 6 所示的动态过程,首先要采取措施缩短调整时间,减小超调量。

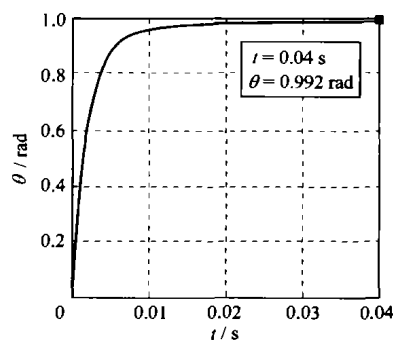
### 2.3.2 比例微分控制校正

微分作用具有超前控制能力,可抑制最大动态偏差,提高系统的稳定性。但微分作用又不能单独使用,因为它的输出仅和偏差的变化速度有关,如果偏差存在而不变化,微分作用是没有输出的。现将比例和微分控制结合使用,取长补短,组成 PD 控制器。

加入微分控制后,控制器的传递函数为  $G_c(s) =$

$K_p + K_d s$ ,令  $K_p = 10$ 、 $K_d = 0.2$ ,修改 motor 文件如下:

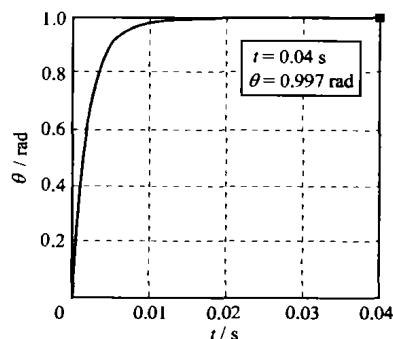
```
...
Kp = 10;
Kd = 0.2;
numcf = [Kd Kp];
dencf = [1];
numf = conv(numcf,num);
denf = conv(dencf,den);
[numc,denc] = cloop(numf,denf);
t = 0:0.001:0.04;
step(numc,denc,t);
```

图7 系统阶跃响应( $K_p = 10, K_d = 0.2$ )

运行 motor 文件,系统的阶跃响应曲线如图 7 所示,由图可知,此时动态过程的品质指标大幅度提高,其超调量、调整时间等均能满足设计要求,只是在调整时间范围内的稳态误差(1~0.992)尚需进一步减小。

由于加入了  $D$  作用,系统的稳定性提高了,可适当增加比例增益  $K_p$  以减小稳态误差,通常可将  $K_p$  提高 20% 左右。

令  $K_p = 12$ 、 $K_d = 0.2$ ,修改参数后再次模拟,得到图 8 的响应曲线,和图 7 相比,其稳态误差(1~0.997)减小了。

图8 系统阶跃响应( $K_p = 12, K_d = 0.2$ )

### 2.3.3 PID 控制器校正

从比例、微分作用的原理可知,PD 作用无法完全消除稳态误差。为此,在 PD 作用的基础上加入

积分作用,以使稳态误差减至0。

加入积分控制后,控制器的传递函数

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

令  $K_p = 12$ 、 $K_d = 0.2$ 、 $K_i = 220$ , motor 程序文件修改如下:

...

$K_p = 12$ ;

$K_i = 220$ ;

$K_d = 0.2$ ;

numcf = [  $K_d$   $K_p$   $K_i$  ];

dencf = [ 1 0 ];

numf = conv(numcf, num);

denf = conv(dencf, den);

...

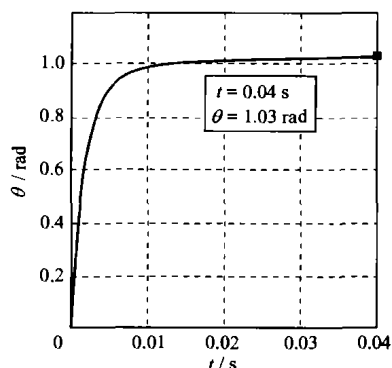


图9 系统阶跃响应 ( $K_p = 12$ ,  $K_i = 220$ ,  $K_d = 0.2$ )

运行 motor 得到如图9所示的阶跃响应曲线。由曲线可知在40 ms处的稳态误差为(1~1.03),未达到设计要求。同时其响应过程产生过调,究其原因,是积分作用太强而产生了过调或振荡负面影响,考虑到原PD控制时其稳态误差已很小,稍有积分作用即可,于是将  $K_i$  设为20。再次修改 motor 文

件,运行得到图10所示的曲线,超调量为0,在35.2ms处的稳态误差已为0,性能远高于设计要求,稳定、准确、快速达到了完满的统一。

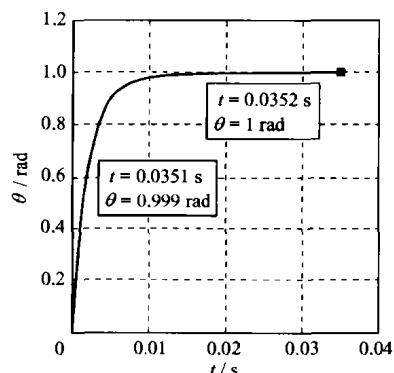


图10 系统阶跃响应 ( $K_p = 12$ ,  $K_i = 20$ ,  $K_d = 0.2$ )

### 3 结 语

通过上述实例的演示可知,当采用不同控制方式及改变控制增益时,MATLAB都能准确、清晰地测绘出直流伺服电机对单位阶跃的输出响应曲线图,且有很高的量化精度,这种预见性,为系统控制规律的选择和参数设定提供了直观而准确的依据。

### 参 考 文 献

- [1] 国务院学位委员会. 同等学力人员申请硕士学位机械工程学科综合水平全国统一考试大纲及指南[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] 宋家成. 实用电工技术手册[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1998.
- [3] 张 铮, 杨文平, 石博强, 等. MATLAB 程序设计与实例应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [4] 方金和. 轮机自动化[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2002.
- [5] 吴锡章. 自动控制理论基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.

(上接第76页)

### 3 结 语

通过以上研究,新循环的性能系数比相同工况下的原循环高。首先是压缩机的回气压力得到提高,进气比容减小,同时避免压缩机因吸气压力过低而影响气阀正常工作,压缩机的排温也降低了,这样改善了压缩机的工作状况,延长其使用寿命。压缩机进气压力的提高,压缩比下降,比容减小,必然使其做功减小,冷凝器单位热负荷减少,单位质量制冷量上升,单位容积制冷量增大,制冷系数提高,起到了节能的效果。

### 参 考 文 献

- [1] E. Q. 索科洛夫, H. M. 津格尔. 喷射器[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [2] 茅以惠, 余国和. 吸收式与蒸汽喷射式制冷机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [3] 燃料化学工业部化学工业设计院. 蒸汽喷射制冷设计手册[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1972.
- [4] 刘代俊, 王钟鸣, 李 军. 喷射式热泵的性能分析[J]. 节能技术, 1996, (1): 7-10.
- [5] 王 斌. 喷射器在蒸汽加热系统节能中的应用[J]. 节能, 1998, (4): 44-45; 1998, (5): 44-45.
- [6] 张 慧, 徐茂堂. 从一机多库的使用要求展望我国舰船冷藏装置的发展[J]. 船舶, 1998, (4): 42-45.
- [6] 段永红, 谭连城. Patl-teja 方程的一种改进[J]. 西安交通大学学报, 1990, (增1).