Education Research Frontier
December 2016, Volume 6, Issue 4, PP.149-154

Design and Experiment Teaching Research Based on Brushless DC Motor Servo System

***Jia Zhang*[1, 2†], *Weixiao Zhang* [1,2]**

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing 100081, China

[†]Email: zhangjia@bit.edu.cn

Abstract

Servo motor is a typical controlled object in automation major. By using different control methods, a variety of control tasks such as motor speed changes, motor angle adjustment and drag load movement and so on can be completed. Brushless DC motor has many advantages such as high operation efficiency, great speed governing, easy to control, etc. It is often used in servo mechanism. Students could deeply grasp classical and modern control methods which are frequently used and understand the effects of different control methods by conducting experimental teaching based on controlling brushless DC motor servo system. The paper designed and realized a set of brushless DC motor servo experiment system, and analyzed the experimental content by the system.

Keywords: Servo system; Brushless DC motor; Experiment system; Experiment Teaching

无刷直流电机伺服系统设计与实验教学研究*

张佳 [1, 2]，张炜霄 [1, 2]

1 北京理工大学自动化学院，北京，100081

2 复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室，北京，100081

摘　要：伺服电机是自动化专业的一个典型被控对象，能够通过各种控制方法完成如电机转速变化、电机角度调整等各种控制任务，拖动负载进行运动。无刷直流电机具有运行效率高、调速性好、易于控制等多种优点，在伺服机构中经常使用。基于无刷直流电机伺服系统的控制开展实验教学，能够让学生深入掌握经典以及现代常用的控制方法，了解不同控制方法的控制效果。本文设计并实现了一套直流无刷电机伺服实验系统，并分析了该系统能够进行的实验教学内容。

关键词：伺服系统，直流无刷电机，实验系统，实验教学

引言

自动控制[1]相关课程是自动化专业学习的核心。伺服系统[2]是一个典型控制对象，控制电机工作使负载按照指定行为运动。为了让学生掌握各种控制方法，开发以伺服系统为对象的配套实验系统[3]是必不可少的。无刷直流电机[4]具有其高功率密度、高可靠性等优点[5]，常在伺服系统中使用。 为了让学生在教学实践中深入掌握伺服控制系统的控制方法，本文组建了基于无刷直流电机的伺服系统实验装置，该装置能为学生提供速度环与位置环的控制实验，其中的方法库提供了不同的控制方法，让学生理解各种控制方法的特性。

1　伺服实验系统的硬件设计

1.1 实验内容及系统性能指标

本文设计的伺服系统控制实验内容包括速度环测试实验和位置环测试实验。通过对电机转速和旋转角

*基金项目：北京理工大学实验室研究项目（2014BITSYB）。

度进行控制，使其能够跟随并复现指定的输入信号形状，使用控制方法库中的不同控制方法分别测试控制效果。为了完成上述实验内容，所设计的实验系统硬件性能指标要求如表 1 所示。

表 1 实验系统性能指标

参数	性能指标
转角幅度	0°-360°
角度定位精度	2mil
最大角速度	60°/s
最大角加速度	120°/s²
最大转动惯量	0.6kgm²
最大阻力矩	1.26Nm
调速范围	0-3000rpm
调速超调量	<10%，振荡小于两次
调速时间	<0.5s

1.2 实验系统硬件部件选型

(1)谐波减速器的选定：谐波减速器将电机的运动传递到负载。实验系统中需要的减速器应能输出大于负载转矩最大阻力矩 1.26Nm 的转矩，并加入摩擦估计。根据调速范围假设电机转速为 3000rpm，负载的最大角速度为 10rpm，则实验系统的最大减速比允许值为 i=3000/10=300。选择 XB1-60 型号谐波减速器，其减速比为 100，额定输出转矩 55Nm，传动效率为 η=85%。

(2)电机的选取：电机的选取与校核[6]需要反复计算修正，基本选择流程如图 1 所示。

首先根据经验公式或大角度调转的参数估计出伺服系统的峰值功率，然后进行电机初选，按照电机的过载能力选取额定功率。初步选择森创公司 57BL-0730N1-LS-B 型无刷直流电机。该电机额定功率 70W，额定电压 24V，额定转速 3000rpm，额定转矩 0.23Nm，最大转矩 0.46Nm，额定电流 4A，最大电流 8A，相间电阻 3.6Ω，转矩常数 0.0785Nm/A，反电势常数为 0.023V/rads^{-1}，转动惯量为 1.19×10^{-4}Kgm^2。

由于确定电机型号后，转动惯量是确定的，结合减速比进行功率校验。电机的额定功率 P_M 应满足

$$P_M \geq \frac{1}{\lambda_m \lambda_\Omega}\left[\frac{M_F}{\eta}+J_L\left(\frac{J_m}{J_L}i^2+\frac{1.1}{\eta}\right)\varepsilon_M\right]\Omega_M \tag{1}$$

其中 λ_Ω 为电机最大转速与电机额定转速之比，λ_m 为电机力矩过载系数，M_F 为负载阻力矩之和，Ω_M 为最高速度，ε_M 为最大加速度，η 为传动效率，J_L 为负载的转动惯量，J_m 为电机的转动惯量。

根据所选择的电机进行校核，

$$P_m > \frac{1}{3}\times\left[\frac{1.5}{0.85}+0.6\times\left(\frac{0.000119}{0.6}\times100^2+\frac{1.1}{0.85}\right)\times2\right]\times1.28\approx2.43W \tag{2}$$

由公式(2)可知电机的额定功率 P_M 满足式(1)要求。另外电机的额定功率还应满足等效工作循环功率式

$$P_{mH} > P_{rms}=\Omega_{rms}M_{rms}=3.4\times0.9=3.06W \tag{3}$$

最后验证力矩过载

$$M_{m\max} > 1.2\times\left[\frac{1.5}{100\times0.85}+\left(0.000119+\frac{1.1}{0.85\times100^2}\times0.6\right)\times2\times100\right]\approx0.068Nm \tag{4}$$

综上所述，所选电机满足电机校核条件，完成伺服电机的选择。

(3)功率驱动的选择：功率驱动装置采用三相全控桥进行整流，逆变部分使用三相 PWM 电压逆变器对直流电压进行调控。出于集成化考虑，选用智能功率模块(IPM)，选择 IRF 公司生产的 IRAMS06UP60B 型智能功率模块。当电机达到最大转矩时所对应的峰值电流大小为：

$$I_m=\frac{M_{m\max}}{K_T}=\frac{0.0177}{0.0785}=0.23A<9A \tag{5}$$

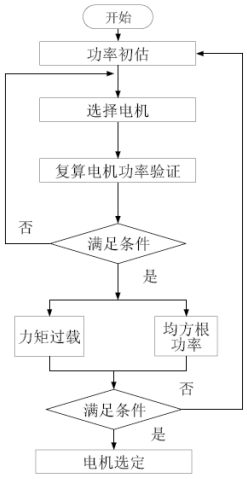


图 1 电机选取与校核流程图

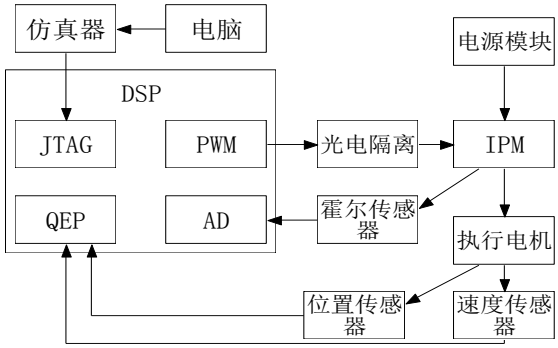


图 2 实验系统的硬件结构

(4)位置传感器的选择：设计性能指标中位置误差小于 0.12°，选择瑞普海德公司 ZSP5208- 001G-3600 型增量式光电编码器。它能够提供 3600 线的角分辨率，频率带宽为 100KHz，分辨的最小角度为：

$$360^{\circ}/3600=0.1^{\circ}<0.12^{\circ} \tag{6}$$

(5)电流传感器的选择：选择 Allegro 公司 ACS704ELC-005 型霍尔电流传感器。

(6)负载模拟装置选择：由于负载最大峰值转矩为 1.26Nm，选择海安县宏福磁粉制动器厂的 CZ-02。

(7)转速传感器选择：根据电机参数，转速量程应大于 3000rpm。考虑到有余量，选择上海自动化仪表股份有限公司 SZGB-7 型光电转速传感器。它利用光电反射进行速度测量，测试量程为 30000 转/分。

(8)控制器选择：选择美国 TI 公司的 TMS320F2812 芯片。

1.3 实验系统的硬件结构

实验系统由上位机输出命令，通过 DSP 中的控制器模块运算输出 PWM 信号，经过 IPM 的功率放大最终传递到执行电机。电机运行中，根据位置与速度传感器等检测装置测得的电机状态信息传入 DSP 中作为反馈，加入控制器的输入中，构成闭环的控制结构。硬件结构如图 2 所示。

2 伺服实验系统控制方法库

为了让学生加强对控制方法的理解与应用，本文设计了无刷直流电机伺服实验系统的控制方法库，学生可以应用不同的控制方法对电机转速与角度进行控制，得到不同的控制效果，加深对控制方法的理解。

2.1 PID 控制模块

PID 控制基于输入与输出的误差，经过比例、积分、微分向被控对象输出控制量，通过对误差的调节控制目标。根据无刷直流电机的数学模型以及已有电机参数，假设负载为空载，速度环的开环传递函数为：

$$G_{kv}=\frac{1}{1.1339\times10^{-3}s+1}\times\frac{78.5}{7.18} \tag{7}$$

速度环输出为：

$$y(s)=\left(k_p+\frac{k_i}{s}+k_d s\right)\times e(s)\times\frac{1}{1.1339\times10^{-3}s+1}\times\frac{78.5}{7.18} \tag{8}$$

位置环开环传递函数为：

$$G_{kp}=\frac{441}{100s(s+441)} \tag{9}$$

位置环输出为：

$$y(s)=\left(k_p+\frac{k_i}{s}+k_d s\right)\times e(s)\times\frac{441}{100s(s+441)} \tag{10}$$

2.2 前馈控制模块

前馈控制是利用已知被控对象信息加快系统对输入响应速度的一种控制方法[7]**错误！未找到引用源。**。指定速度为 r(s)时，通过传感器得到速度反馈 y(s)后，将 P 控制的输入量设置为指定速度与速度反馈的差，经过 PID 模块后输出，同时以指定速度为输入加入前馈控制，二者之和作为输出量，此时速度环输出为：

$$y(s)=\left[k_p\times e(s)+a_1\times sr(s)+a_2\times s^2r(s)\right]\times\frac{1}{1.1339\times10^{-3}s+1}\times\frac{78.5}{7.18} \tag{11}$$

同理在位置环控制中，加入前馈控制模块后的输出为：

$$y(s)=\left[k_p\times e(s)+a_1\times sr(s)+a_2\times s^2r(s)\right]\times\frac{441}{100s(s+441)} \tag{12}$$

2.3 模糊控制模块

模糊控制以模糊逻辑集合为工具将人类经验与自然语言转化为具体算法，能够有效利用专家经验处理复杂问题[8]**错误！未找到引用源。**。在进行速度环控制时，速度环的输出为：

$$y(s)=u\times f\left[e(s)/e,se(s)/ec\right]\times\frac{1}{1.1339\times10^{-3}s+1}\times\frac{78.5}{7.18} \tag{13}$$

同理进行位置环控制时，位置环的输出为：

$$y(s)=u\times f\left[e(s)/e,se(s)/ec\right]\times\frac{441}{100s(s+441)} \tag{14}$$

其中 e 与 ec 为模糊控制的归一化系数，u 是模糊控制的输出放大系数，f 为模糊控制函数。

3 实验过程及结果

3.1 实验项目

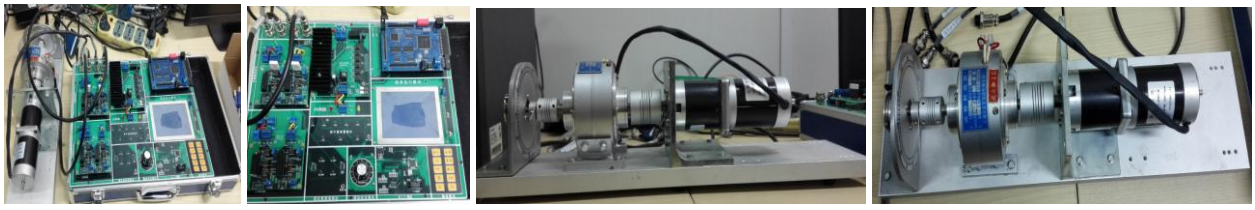
在速度环或位置环实验中，学生选择一种输入信号、控制方法和外加负载，并进行参数设置，如图 2 所示。通过实验，学生可以检验不同输入信号及负载大小的情况下，不同算法的参数对跟踪曲线的影响，在实践中加深对控制理论及各种控制方法的认识。

表 2 实验项目

输入信号	控制方法	外加负载
阶跃信号	PID 控制	空载
斜坡信号	前馈控制	空载
正弦信号	模糊控制	负载力矩大

3.2 实验系统

本文所构建的伺服实验系统如图 3 所示，交互界面软件如图 4 所示。界面右侧可以展示电机转速或角度波形，下方是功能按钮，可以对程序进行功能操作。



(a)系统整体　(b)系统驱动控制箱　(c)系统机组左视图　(d)系统机组俯视图

图 3 伺服实验系统实物图

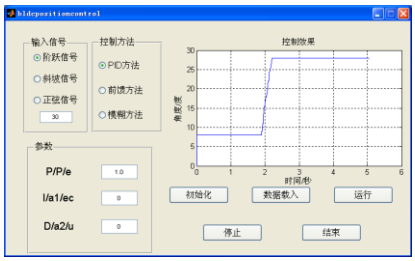
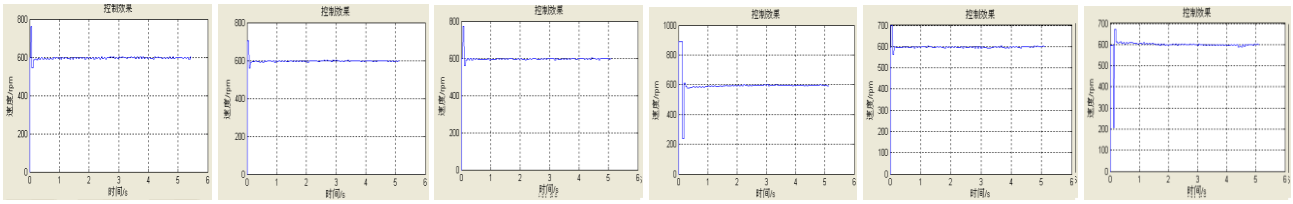


图 4 软件界面

3.3 基于 PID 方法的速度环实验

以速度环实验为例，输入信号选择阶跃信号，采用 PID 控制方法。设定阶跃目标参数为 600rpm 时，不同 PID 参数下的电机转速控制效果曲线如图 5 所示。



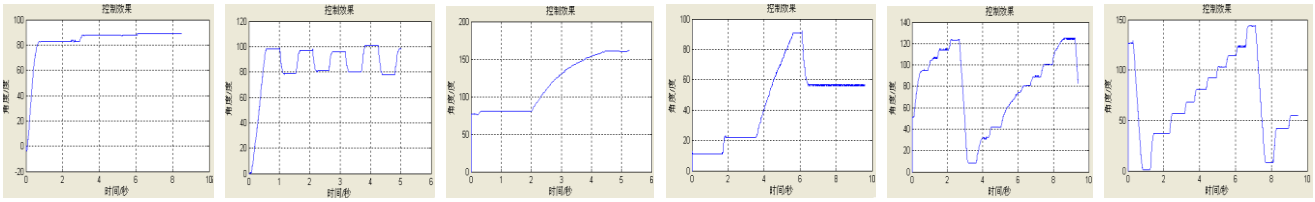
(a)P=0.2 (b)P=0.2 I=1 (c)P=2 I=1 (d)P=2 I=0.1 (e) P=2 I=1 D=1 (f) P=2 I=1 D=2

图 5 速度环实验 PID 控制效果图

由图 5(a)，只有比例项 P=0.2 时响应具有稳态误差，抖动较为剧烈。图 5(b)加入积分项 I=1，稳态误差逐渐消除。进一步增大比例项至 P=2，超调量明显增加，如图 5(c)。此时将 I 改为 0.1，引起系统在一定时间不稳定，如图 5(d)。在图 5(c)基础上，加入微分项 D=1 后，电机转速超调量大幅减小，如图 5(e)。但微分项过大会引起系统不稳定，将 D 增加至 2，转速曲线变得不稳定且振荡加剧，如图 5(f)。由图 5 可知，只有 P 项时系统具有稳态误差，加入 I 项后稳态误差消除；随着 P 项的增大，响应速度加快但超调量变大；加入 D 项可有效减小超调但不能随意增大。由此验证了 PID 控制方法的理论与实际效果是相符的。

3.4 基于模糊控制方法的位置环实验

以位置环实验为例，采用模糊控制方法。设定阶跃目标参数为 90° 与斜坡斜率为 20°，在不同参数下电机角度控制效果如图 6 所示。



(a) e=1 ec=1 u=0.01 (b) e=0.1 ec=0.1 u=0.01 (c) e=5 ec=5 u=0.01 (d) e=10 ec=10 u=0.02 (e) e=1 ec=1 u=0.02 (f) e=1 ec=1 u=0.2

图 6 位置环实验模糊控制效果图

对于阶跃输入，图 6(a)中 e=1、ec=1 是个较好的系数范围。当输入量的范围过小或过大时，误差与误差的变化率将不能很好归一化处理。范围系数过小时，如图 6(b)中的 e=0.1、ec=0.1，控制方法对误差与误差变化率过于敏感，容易产生振荡，稳态误差不为零。范围系数过大时，如图 6(c)中的 e=5、ec=5，响应十分缓慢且误差明显。对于连续变化的斜坡输入而言，也需要调整输入范围至合适的区间 e=10、ec=10，如图 6(d)，输出能迅速跟随输入的变化。当输入范围处在不合适的区间如 e=1、ec=1 时，输入范围系数过小引起响应发生振荡，影响跟踪效果，如图 6(e)。当输出范围增加，系统响应会进一步加快，输出过大会引起系统的不稳定。如图 6(f)，在同样的输入范围 e=1、ec=1 时，当 u 从 0.02 增至 0.2 后，系统响应变得不稳定。

4 结论

为了丰富教学手段，在实验中展示伺服系统控制方法的特性，加深学生对各种控制方法的理解，本文设计了一套直流无刷电机伺服实验系统，构建了系统的控制方法库，并编制了实验系统的软件。该系统能够对电机转速与角度进行控制，能够完成所设计的实验内容和实验项目。通过该系统，学生能够掌握各种控制方法，并深入理解各种方法的参数设置对控制效果的影响，得到了较好的实验教学效果。

致谢

感谢北京理工大学实验室研究项目（2014BITSYB）的资助。

REFERENCES

[1] Bingda Sun, Zhikun Liang. Automatic Control Principles. Beijing: Machinery Industry Press,2000.

[2] Haixiao Yuan. “Research on the Position Servo System Based on the Permanent Magnet Brushless DC Motor”. Master diss.. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[3] Jun He, Bin Xia. “Development of Experimental System Based on Principle of Digital Servo Control”. Experimental Technology and Management,2014,(09):91-94.

[4] Rui Dai, Longhan Cao, Junqiang He, etc. “Particle Swarm Optimization Based Single Neuron Adaptive Control for Brushless DC Motor”. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, (04):57-63+70.

[5] Xiaoyuan Wang, Tao Fu. “Brushless DC Motor Control System Based on Fuzzy R BF Neural Network”. Micromotors, 2015,48(11):33-36+88.

[6] Mingjun Chen. Weapon Servo System Engineering Practice. Beijing: National Defense Industry Press,2013.

[7] Fulin Teng, Hongsheng Li, Hongyu Ge, etc. Design on a Novel Feedforward Control Structure in Servo System. Electric Drive,2012,(02): 61-64.

[8] Lei Fu. “Design and Simulation Research of Fuzzy Control System for BLDC Based on DSP”. Master diss.. Nan Chang University,2008.

【作者简介】

[1] 张佳（1980-），女，汉，博士，实验师，研究方向为智能控制，毕业于北京理工大学。Email:zhangjia@bit.edu.cn.

[2] 张炜霄（1991-），男，汉，硕士，研究方向为智能控制，北京理工大学硕士研究生。Email: zhangweixiao@bit.edu.cn