

某高炮随动控制系统的设计

焦仁雷, 谈乐斌, 潘孝斌

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 火炮火控系统自动、半自动高炮武器的核心, 火控系统设计的好坏直接影响火炮的设计精度、快速反应能力及可靠性等性能指标; 文章通过对火炮火控系统调节器的设计, 基于 PWM 功率放大器与直流伺服电机的数学模型建立电流环、速度环及位置环三闭环系统的数学模型; 通过 SIMULINK 对模型进行实时仿真, 仿真结果表明, 该 PI 三环调节器的设计满足火控系统动态、静态性能, 加快系统响应速度, 具有较好的快速跟踪能力、抗负载扰动以及较高的瞄准精度。

关键词: 火控系统; 三环控制器; 直流电机; 伺服

Design of Anti-aircraft Gun Servo Control System

Jiao Renlei, Tan Lebin, Pan Xiaobin

(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Artillery fire control system is the core of automatic, semi-automatic weapon, fire control system design directly affects the design of artillery precision, responsiveness, reliability and other performance indicators. The design parameters of gun fire control system, based on mathematical modeling PWM power amplifier and DC motor, establishes current loop, velocity loop and position loop three closed-loop system mathematical model, the model in real time through SIMULINK, the simulation results show that, the PI ring controller design to meet dynamic and static performance of fire control system, speed up the system response speed, resistance to load disturbance, good fast-tracking capabilities and high pointing accuracy.

Key words: fire control; system loop controller; DC motor; servo

0 引言

高炮火控系统是用于控制高炮对空中目标实施有效射击的自动控制系统^[1]。火控系统主要包括跟踪雷达、搜索雷达、电视跟踪装置、数字式计算机、中央控制台、数据传输装置和电源^[2], 是火炮系统的重要部分, 通过控制伺服直流电机驱动炮塔的快速、稳定跟踪。近年来, 目标速度越来越快、越来越灵巧, 对火炮火控系统提出新的要求, 根据国内外实际作战指标要求, 即动态性能具有较好的跟踪性能和较强的抗负载扰动能力^[3], 精确无静差, 新型的数字火控系统已经代替了模拟伺服控制系统。随着高速 DSP 技术的发展, 将 DSP 技术运用于随动控制系统中, 使整个系统精度更高、响应速度更快。根据 PID 控制器结构简单、可靠性高、稳定无静差以及控制精度高的特点, 基于 PWM 功率放大器的数学模型, 建立高射炮的方向机与高低机的电流环、速度环、位置环三闭环 PI 控制器数学模型。在 SIMULINK 软件下, 系统模型进行在线实时仿真, 分析高射炮的方向机与高低机静态性能指标, 为以后机电联合仿真或者实验提供参考, 并使系统具有一定的可信度。

1 随动控制系统的设计

随动控制系统采用位置环、速度环和电流环三闭环结构形

收稿日期: 2013-08-21; 修回日期: 2013-10-20。

基金项目: 江苏省博士后科学基金(2013M531359)。

作者简介: 焦仁雷(1986-), 男, 山东曹县人, 硕士研究生, 主要从事机电系统灵巧化与智能化方向的研究。

谈乐斌(1962-), 男, 江苏南京人, 教授, 硕士生导师, 主要从事火炮及机械系统设计与计算机辅助工程、人一机—环境系统工程等方面的研究。

式, 结构框图如图 1 所示^[4-6]。其中电流环为内环, 主要作用是调节系统的电流, 使电机具有足够的转矩, 能使系统稳定运行。速度环作用是增强系统的抗干扰能力, 快速、稳定跟踪。位置环的反馈来自增量式编码器, 精度由编码器的分辨率决定, 作用是保证系统具有良好的动态跟踪性能。

1.1 直流伺服电机的数学模型

直流电机具有启动转矩大、运动性能良好、控制特性及调

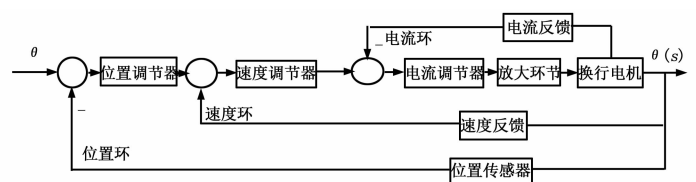


图1 随动控制结构框图

速范围宽的优点。本系统所需要的力矩较小, 采用直流伺服电机较易控制。

电枢回路的微分方程式:

$$e_d + iR + L \frac{di}{dt} = u$$

机械运动方程

$$T_d T_m \frac{d^2 n}{dt^2} + T_m \frac{dn}{dt} + n = \frac{u}{C_e}$$

设取状态变量: $x_1 = i$, $x_2 = n$; 输出量: $y = n$ 。

状态方程表达式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C_e}{L} \\ \frac{C_m}{GD^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = x_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

根据空间状态方程搭建直流伺服电机的传递函数框图，如图 2 所示。

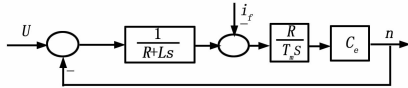


图 2 直流伺服电机的传递函数框图

其中： i_f 为负载电流； C_e 为反电动势； R 、 L 分别为直流伺服电机电枢回路的电阻、电感；

$$T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m} = \frac{J R}{C_e C_m} : \text{直流伺服电机的机械时间常数,}$$

根据电机参数计算高低直流伺服电机 $T_m = 0.28 \text{ s}$ ，方位直流伺服电机 $T_m = 0.388 \text{ s}$ ；

$$T_l = \frac{L}{R} : \text{直流伺服电机的电气时间常数, 根据电机参数}$$

计算高低直流伺服电机 $T_l = 0.00222 \text{ s}$ ，方位直流伺服电机 $T_l = 0.0014 \text{ s}$ 。

1.2 电流环设计

电流环的作用主要是限制电流、获取稳定力矩输出，防止电压的波动，使系统快速达到稳定。电流设计好坏直接影响整个火炮系统的性能要求。电流调节器采用 PI 调节器，根据电机参数计算出直流伺服电机的电气时间常数 T_l 远小于机械时间常数 T_m ，因此，在电流调节的过程中，反电动势变化比速度的变化来的慢，在电流设计时，可以忽略反电动势对系统的作用，其中电流环调节器传递函数 $W_{ACR} = k_{11} \frac{\tau_{11}s + 1}{\tau_{11}s}$ ，电流环的传递函数结构框图如图 3 所示。

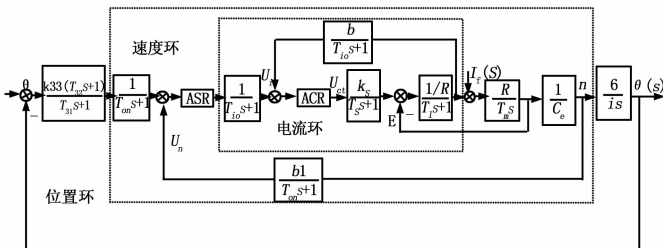


图 3 位置环的传递函数结构框图

典型 I 系统具有超调量小、稳定性好等优点，又考虑电流环为系统的内环，要求该系统的快速响应时间短，所以电流环设计成典型 I 系统，参数值如表 1 所示。

表 1 电流环参数值表

参数	高低射角	方向射角
k_s	23	23
T_s	0.0017 s	0.0017 s
T_{ω}	0.002 s	0.002 s
b	0.1	0.07
T_m	0.28 s	0.388 s
T_l	0.00222 s	0.0014 s
R	0.9 Ω	1.04 Ω
C_e	0.125 V · min/r	0.132 V · min/r

高低射角与方向射角的晶闸管整流装置滞后时间常数 T_s

$$= \frac{1}{2mf} = \frac{1}{2 \times 6 \times 50} = 0.0017 \text{ s}, \text{ 采用全控桥式整流电路 } m = 6, f \text{ 为电力系统的频率;}$$

T_{io} 为电流环滤波时间常数；

晶闸管装置放大系数 k_s ，选取转速输出限幅值 $U_{KM} = 10 \text{ V}$ ，可以得到

$$k_s = \frac{U_{d0}}{U_{km}} = \frac{1.05 \times U_{nm}}{U_{km}} = \frac{1.05 \times 220}{10} = 23$$

电流反馈系数 b 。

高低射角：选取转速调节器输出限幅值 $U_{IM} = 1 \text{ V}$ ，可以得到

$$b = \frac{U_{im}}{I_{dm}} = \frac{1}{1.5 I_{max}} = \frac{1}{1.5 \times 6.7} = 0.1 \text{ V/A}$$

方向射角：选取转速调节器输出限幅值 $U_{IM} = 1 \text{ V}$ ，可以得到

$$b = \frac{U_{im}}{I_{dm}} = \frac{1}{1.5 I_{max}} = \frac{1}{1.5 \times 9.3} = 0.07 \text{ V/A}$$

根据典型 I 系统动态性能指标，超调量 $\sigma\%$ 不超过 5%，阻尼比 $\xi = 0.707$ ， $\omega T_{\Sigma i} = 0.5$ ， $T_{\Sigma i} = T_s + T_{\omega}$ ， $\tau_{11} = T_l$ 。

(1) 截止频率 ω

$$\text{高低射角: } \omega = \frac{0.5}{T_{\Sigma i}} = 135.135 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\text{方向射角: } \omega = \frac{0.5}{T_{\Sigma i}} = 135.135 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

(2) 电流环调节器放大倍数

$$\text{高低射角: } k_{11} = \frac{\tau_{11} \times T_l \times R}{b \times k_s} = 0.1929$$

$$\text{方向射角: } k_{11} = \frac{\tau_{11} \times T_l \times R}{b \times k_s} = 0.1222$$

(3) 满足假设要求

在电流环设计时，忽略反电动势以及惯性时间常数对系统的影响，设计应该满足：

高低射角：

$$\omega \leq 1/(3 \times T_s) = 196.0784 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\omega \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_s \times T_{\omega}}} = 180.7754 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\omega \geq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_m \times T_l}} = 120.3277 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

方向射角：

$$\omega \leq 1/(3 \times T_s) = 196.0784 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\omega \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_s \times T_{\omega}}} = 180.7754 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\omega \geq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_m \times T_l}} = 128.7186 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

经验证，系统在设计电流环的参数满足假设条件。

1.3 速度环设计

速度环作为系统的中间环节，起着承上启下的作用，主要作用是调节速度的变化，对变化的负载具有一定的抗干扰能力，通过电压调节速度，具有动态性能好，稳定无误差。速度环调节器采用 PI 调节器，根据电机参数计算出直流伺服速度环滤波时间常数 T_{ω} 和电机的电气时间常数 T_l 都远小于机械时间常数 T_m ，即 $T_{\Sigma n} = 2 \times T_{\Sigma i} + T_m$ ，其中 $T_{\omega} = 10 \text{ ms}$ 。速度环的传递函数结构如图 4 所示。

采用双环控制的目的是获得近似理想的启动过程，在理

想启动过程速度调节器 ASR 分不饱和、饱和以及退饱和 3 个阶段, 理想启动过程速度和电流的波形如图 4 所示。

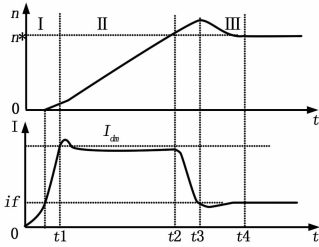


图 4 双环控制直流调速系统启动过程速度和电流的波形

转速的超调与动态速降均可由抗扰指标衡量, 而抗扰指标以典型 II 系统为佳, 按典型 II 系统设计, 取 $h=5$, 速度环的开环增益 $KN = \frac{h+1}{2h^2 T_{\Sigma n}^2} = 396.3535 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 。被调节对象

$\frac{b_1 R}{bC_e T_m (T_{\Sigma n} s + 1)s}$, 被看作是积分惯性环节, 速度调节器传

递函数表达式: $W_{ASR} = k_{22} \frac{\tau_{22} s + 1}{\tau_{22} s}$

速度环系统的开环传递函数:

$$W_n(s) = \frac{k_{22}(\tau_{22}s + 1)}{\tau_{22}s} \cdot \frac{b_1 R}{bC_e T_m (T_{\Sigma n} s + 1)s} = \frac{b_1 R k_{22} (\tau_{22} s + 1)}{\tau_{22} b C_e T_m (T_{\Sigma n} s + 1) s^2} = \frac{KN (\tau_{22} s + 1)}{(T_{\Sigma n} s + 1) s^2}$$

速度环的开环增益 $KN = k_{22} \frac{b_1 R}{b C_e T_m}$, 结合速度环的开环增益公式, 速度环调节器的比例放大系数:

$$\text{高低射角: } k_{22} = \frac{(h+1)bC_e T_m}{2hb_1 RT_{\Sigma n}} = 72.4863$$

$$\text{方向射角: } k_{22} = \frac{(h+1)bC_e T_m}{2hb_1 RT_{\Sigma n}} = 35.6967$$

高低射角与方向射角速度环的时间常数

$$\tau_{22} = h * T_{\Sigma n} = 5 * 0.0174 = 0.0870 \text{ s}$$

高低射角与方向射角的速度环的截止频率

$$\omega_{22} = KN * \tau_{22} = 34.4828 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

高低射角与方向射角满足假设要求, 对于系统简化忽略小时间常量, 系统参数应满足:

$$\omega_{22} \leq \frac{1}{3} * \sqrt{\frac{\omega}{T_{\Sigma n}}} = 63.7033 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\omega_{22} \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{2T_{\Sigma n} T_{om}}} = 38.7492 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

经验证, 系统在设计速度环的参数满足假设条件, 系统简化后可以反映实际运动性能。

1.4 位置环设计

位置环作为系统的外环控制, 是位置随动系统的主要控制特征, 是系统输出随着输入发生变化, 位置调节器输出限幅值限制系统的最大速度, 保证其平稳性。位置环的传递函数结构如图 4 所示。

i 为系统的减速比, 高低机和方向机分别为 40 与 90; $k33$ 为位置环放大系数。

2 仿真结果与分析

2.1 速度环仿真结果与分析

借用 SIMULINK 仿真软件对速度环进行在线仿真, 高低

机与方向机速度环仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。

速度环调节器采用 PI 控制, 由仿真图 5 知, 系统稳定无静差, 具有良好的控制性能。仿真速度和电枢电流与图 5 双环控制直流调速系统理想启动过程速度和电流的波形基本一致, 充分说明模型的准确、可靠。

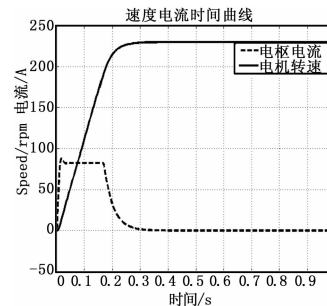


图 5 高低射角速度环仿真曲线

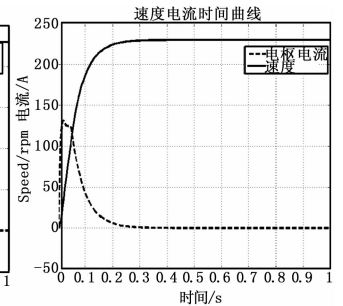


图 6 方向射角速度环仿真曲线

2.2 位置环仿真结果与分析

系统高低机阶跃位置环仿真曲线如图 7 所示, 误差仿真曲线如图 8 所示。

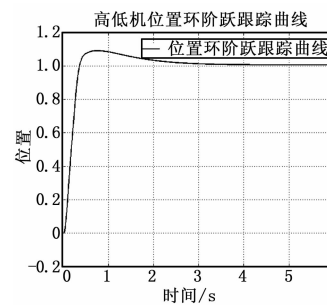


图 7 高低机位置仿真曲线

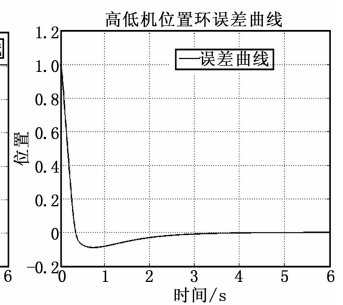


图 8 高低机位置误差仿真曲线

系统方向机阶跃位置环仿真曲线如图 9 所示, 误差仿真曲线如图 10 所示。

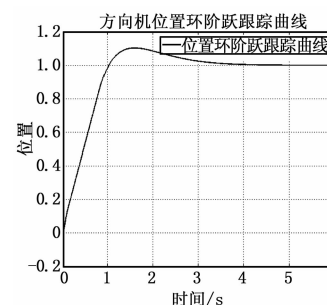


图 9 方向机位置仿真曲线

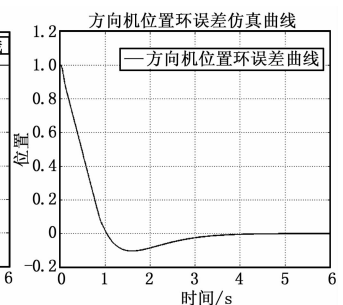


图 10 方向机位置误差仿真曲线

由仿真结果知, 采用三闭环控制对系统具有良好的快速跟踪、精确定位, 满足系统的动、静态性能。

3 结论

基于 PWM 功率放大器的数学模型, 建立系统的三闭环控制, 并运用 SIMULINK 对电流环、速度环和位置环在线仿真, 从仿真结果知, 该系统设计合理满足各性能指标要求, 稳定性好、具有快速跟踪能力, 为现代数字式火炮火控系统的设计与研究提供一定的理论依据。

(下转第 1829 页)

检验解码状态之间的转换及时序要求是否符合要求^[10]。

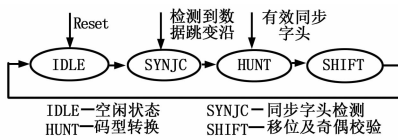


图 5 解码状态转换

在实际验证过程中, 当设计的属性与断言所描述的属性一致时, 断言不会有动作; 当设计的属性与断言所描述的属性不一致时, 即设计的运行偏离了最初的设计需求, 此时验证过程就会停止并生成相应的错误报告。针对 ARINC629 控制器的解码状态机转换, 编写相应的属性, 仅以 FSM_chk3 为例, 对解码状态机进行属性描述及覆盖率收集。其部分代码如下:

FSM_chk3: 状态 HUNT 和 SHIFT 不能直接由状态 IDLE 跳转得到。

```

// 属性描述
property p_forbid_trans3a;
@ (posedge Clk)
(((state == HUNT) || (state == SHIFT)) && ! Reset) | -
> past((state == IDLE) == 0);
endproperty
// 断言验证
a_forbid_trans3a;
assert property( p_forbid_trans3a );
// 覆盖率收集
c_forbid_trans3a;
cover property( p_forbid_trans3a );
  
```

3 验证结果分析

本平台在 QuestaSim10.0c 验证工具上对 ARINC629 控制器进行验证。

图 6 为语句和分支的覆盖率报告, 其中 Stmt% 为语句覆盖率, Branch% 为分支覆盖率。U_ARINC629_TC.v 为控制器的顶层模块, rxcontrol.v 为控制器的接收模块, txcontrol.v 为控制器的发送模块, shiftreg.v 为控制器的协议模块。图中顶层文件语句覆盖率达到 98.4%, 分支覆盖率达到 97%, 均未达到 100%, 查看其代码发现造成覆盖率达不到 100% 的原因是 ARINC629 控制器设计文件中存在 else 或 default 等语句。

(Recursive Coverage Aggregation) - Default						
File	Stmt	Stmts hit	Stmt %	Branch	Branches hit	Branch %
top						
xi						
tb						
U_ARINC629_TC	126	124	98.4%	66	64	97%
txcontrol	12	11	91.7%	14	13	92.9%
shiftreg	12	12	100%	8	8	100%
rxcontrol	15	15	100%	6	6	100%

图 6 语句和分支覆盖率

（上接第 1823 页）

参考文献:

[1] 谈乐斌. 火炮概论 [M]. 北京理工大学出版社, 2005.
 [2] 薄煜明, 等. 现代火控理论与应用基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
 [3] 程远斌. 某火炮系统设计与控制模型的建立 [J]. 四川兵工学报, 2002, 2: 17-21.

Cover Directives 窗口下观察到的覆盖率信息如图 7 所示, Count 为断言激活次数, Cmplt% 为断言指令的覆盖率。由图可知, 经验证后待测设计的各项功能均已达到其设计需求, 且实现率为 100%。

Name	Language	Enabled	Count	Cmplt %
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_start1	SVA	✓	171	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_data1	SVA	✓	166	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_stop1	SVA	✓	107	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_start2	SVA	✓	149	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_data2	SVA	✓	144	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_stop2	SVA	✓	97	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_forbit_trans3a	SVA	✓	116	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_forbit_trans3b	SVA	✓	147	100%
/top/U_ARINC629_TC/asn/c_forbit_trans3c	SVA	✓	91	100%

图 7 功能覆盖率

4 结束语

通过分析验证结果可知, 该平台能够全面有效地对 ARINC629 控制器进行验证, 并确保后者完成了预期的功能。同时, 由于参照 ARINC629 协议, 并采用了可配置的测试环境及多种验证手段, 不但提高了该平台的可重用性, 且使得验证更加直观有效。平台架构及搭建方法具有可重用性, 更改验证平台中的数据生成模块即可用于其他类似设计的验证。

参考文献:

[1] Spear C. System Verilog for verification [M]. Synopsys Inc, 2006.
 [2] 朱 良, 杜承烈. 通用航空总线测试与分析软件的设计和实现 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24 (7): 125-127.
 [3] Aeronautical Radio, INC., ARINC Specification 629P1-5, Part1: Technical Description [Z]. Aeronautical Radio, INC., March 31 1999.
 [4] Gallon L, Juanole G, Blum I. Modeling and analysis of the ARINC Specification 629 CP MAC layer protocol [Z]. 1997.
 [5] 王继中, 樊晓樵, 黄小平. “龙腾”处理器 FPGA 验证平台的优化设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (1): 170-172.
 [6] Bergeron J, Cerny E, Hunter A, Andrew Nightingale. Verification Methodology Manual for System Verilog [M]. Synopsys Inc. & ARM. 2006.
 [7] SasanIman. Step-by-Step Functional Verification with System Verilog and OVM [M]. Springer, 2008.
 [8] Vijayaraghavan S, Ramanathan M. A Practical Guide for System-Verilog Assertions [M]. Springer, 2005.
 [9] Cerny E, Dudani S, Havlicek J, et al. The Power of Assertions in System Verilog [M]. Springer, 2010.
 [10] 周德新, 李 珊. OVL 断言验证库的 ARINC429 通讯板块设计验证 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31 (10): 2172-2174.

[4] 张红莲. 交直流调速控制系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
 [5] 郭 海, 吴益飞, 郭 毓. 车载发射转塔高性能随动系统智能控制策略研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (5): 1222-1228.
 [6] 金剑飞. 随动 (改) 系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.