



# 自适应控制

---

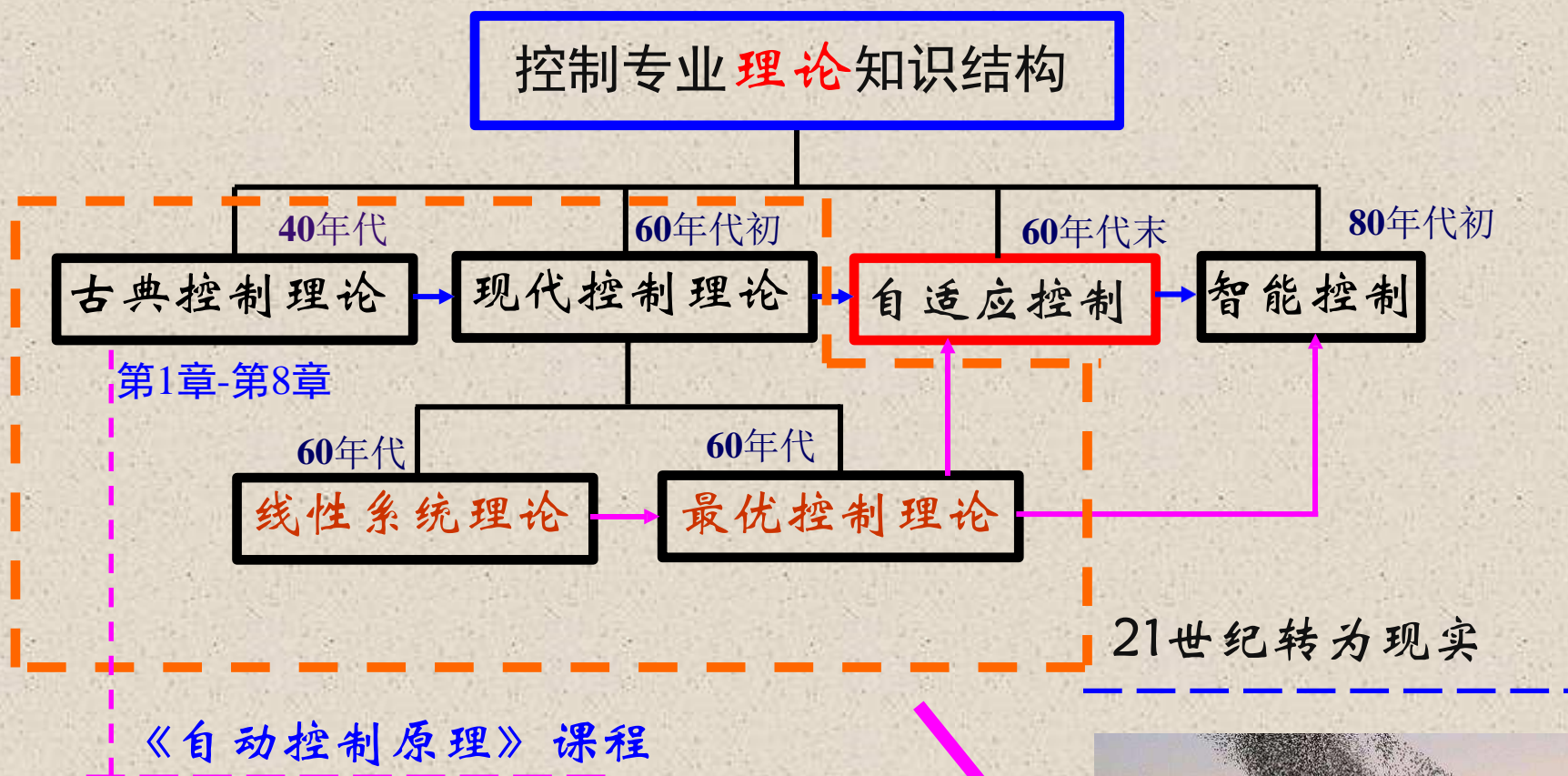
主讲：吕梅柏


电话：15829682227

E-mail: [nwpuiet@nwpu.edu.cn](mailto:nwpuiet@nwpu.edu.cn)

办公室：航天北楼202室

# 本课程在控制学科中的地位





# 自适应控制原理与应用

## 第一章 绪论

自适应控制基本概念

## 第二章 自适应控制的理论基础

## 第三章 连续时间模型参考自适应

李亚普诺夫稳定性理论设计MRAC

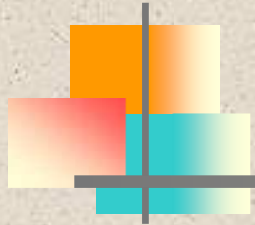
用波波夫超稳定性理论设计MRAC

## 第四章 自校正控制

## 第五章 变结构控制理论及其应用

## 第六章 自抗扰控制

## 第七章 模糊自适应控制



# 第七章 模糊自适应控制

---

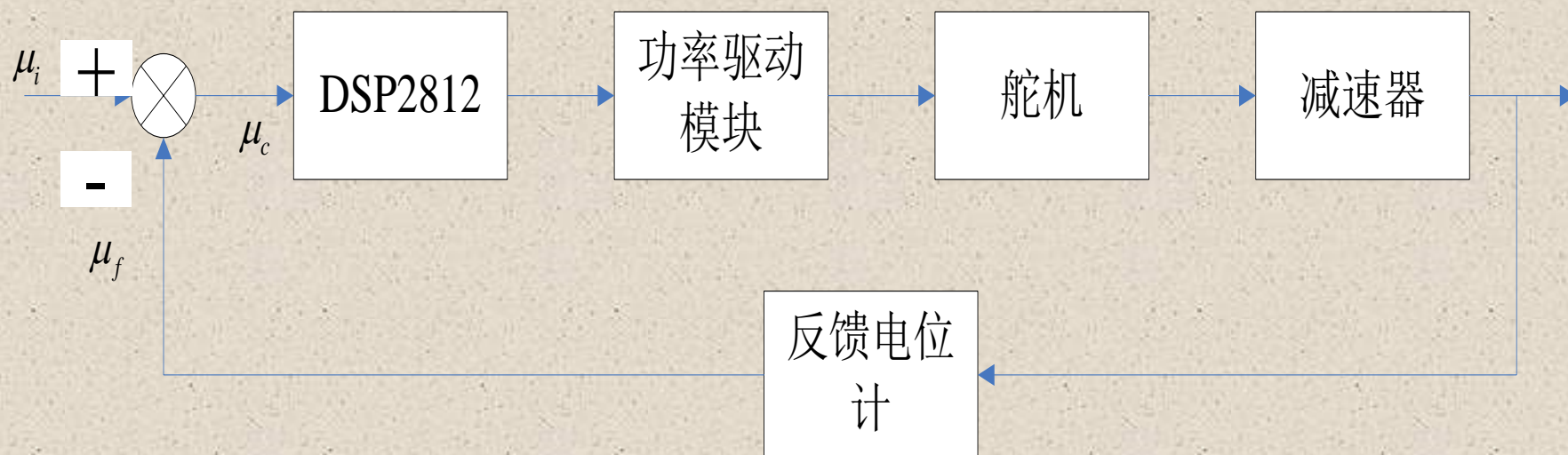
- 1 模糊控制基本概念
- 2 模糊自适应控制器
- 3 模糊自校正控制



# 例：电动舵机系统的模糊控制

## 1. 电动舵机系统的组成

电动舵机系统一般由控制器、驱动器、伺服电机、减速传动机构和反馈电位器等五大部分组成。通常情况下，电动舵机系统的组成如下图所示。它是一个典型的位置反馈系统。



## 2. 电动舵机的工作原理

电动舵机系统的工作原理是，根据导弹制导控制电路输出的一定大小和极性的舵控制信号，操纵舵机舵的舵面转动。

当实际舵偏角  $\delta$  与要求的角度存在误差时，在控制器的作用下产生误差电压信号，该误差经过驱动器进行功率放大后，驱动伺服电机转动。伺服电机的力矩通过减速传动机构放大，带动舵面，使舵面向要求的角度偏转。误差为正时，加在伺服电机上的直流平均电压为正，舵面向正方向转动；误差为负时，加在伺服电机上的直流平均电压为负，舵面向负方向转动。

当舵面偏转到要求的角度时，误差信号为零。加在伺服电机上的直流平均电压为零，舵面失去驱动力矩停止转动。舵面转动的角度  $\delta$ ，通过反馈电位器形成舵反馈信号，提供给控制器，形成系统的闭环控制。

### 3. 驱动器的工作原理

驱动器的作用，是将前级来的信号通过功率放大，来驱动伺服电机的转动。对驱动器的要求是，功率放大电路的效率要高。驱动器由脉宽调制（PWM）和功率转换两部分组成。



#### 4. 反馈电位计的工作原理

反馈装置通常采用反馈电位计实现，它将舵面的角位移变成电压量，以便实现位置反馈。反馈电位计具有体积小，精度高，线性好，简单可靠的优点，非常适合用作位置反馈。

#### 5. 控制器的工作原理

控制器完成对舵控制信号和舵反馈信号的误差综合和放大。控制器若简单地作为放大环节，整个舵机系统的稳定性、快速性往往难于满足系统指标要求。



为了在系统稳定的前提下，提高系统的快速性，控制器通常都包含有校正环节。传统的校正环节可以采用超前校正、PID校正等实现。随着新的控制技术的发展和数字信号处理器的出现，变结构控制、模糊控制等先进的控制算法，可以通过数字信号处理器的编程得以在线实现，因此在伺服控制领域逐步得到应用。控制器的形式和参数，需要根据具体的舵机性能指标进行设计。

# 模糊自整定PID控制器

1. 模糊控制是近代控制理论中建立在模糊集论基础上的一种基于语言规则与模糊推理的控制理论，它是智能控制的一个重要分支。模糊集合和模糊控制的概念是由美国加州大学教授L. A. Zadeh 在其《Fuzzy sets》及《Fuzzy Algorithm》等论著中首先提出的。模糊控制是根据对控制对象的粗略知识以及人们的生产技能等知识，导出自然语言的控制规则，利用模糊理论进行控制的一种控制方法。

模糊控制有以下的主要特点：

（1）模糊工程的计算方法虽然是运用模糊集理论进行的模糊算法，但最后得到的控制规律是确定性的、定量的条件语句。不需要根据机理与分析建立被控对象的数学模型，对于某些系统，要建立数学模型是很困难的，甚至是不可能的。

（2）与传统的控制方法相比，模糊控制系统依赖于行为规则库，由于是用自然语言表达的规则，更接近于人的思维方法和推理习惯，因此，便于现场操作人员的理解和使用，便于人机对话，以得到更有效的控制规律。



(3) 模糊控制与计算机密切相关。从控制角度看，它实际上是一个由很多条件语句组成的软件控制器。模糊控制以模糊集合论为基础，把人的控制策略的自然语言转化为计算机能接受的算法语言来实现。

模糊控制必须解决三个基本问题：

第一，先通过传感器把要监测的物理量变成电量，再通过模数转换器把它转换成精确的数字量，精确量输入至模糊控制器后，把这个精确量转换成模糊集合的隶属函数，这一步称为精确量的模糊化，其目的是把传感器的输入转换成知识库可以理解和操作的变量格式；

第二，根据有经验的操作者或者专家的经验制定出模糊控制

规则，并进行模糊逻辑推理，其目的是得到一个模糊输出集合，即一个新的模糊集合隶属函数，这一步称为模糊控制规则的形成和推理，其目的是用模糊输入值去适配控制规则，为每个控制规则确定其适配的程度，并且通过加权计算合并规则的输出，得到输出控制模糊集合；

第三，根据模糊逻辑推理得到的输出模糊集合隶属函数，用恰当的方法找一个具有代表性的精确值作为控制量，这一步称为模糊输出量的解模糊判决，其目的是把分布范围概括合并成单点的输出值，加到执行器上实现控制。

## 2. 自整定模糊PID控制器的结构

目前常规的PID调解器大量应用于工业控制控制，并取得了较好的控制效果。可把模糊理论与PID控制算法结合起来构成模糊PID控制器，其中自整定模糊PID控制器的应用较为广泛。采用计算机实现的PID控制算法，其PID 控制规律为：

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=1}^{n-1} e(i) + K_d e_c(k)$$



式中:

$e(k)$  : 系统偏差

$e_c(k)$  : 系统偏差变化率

$K_P$  : 比例系数

$K_i$  : 积分作用系统

$K_d$  : 微分作用系数

模糊自整定PID控制器是一种常规PID调节器基础上，利用模糊集合理论建立参数  $K_p$ 、 $K_i$  与  $K_d$  同误差绝对值  $|e(k)|$  和误差变化率绝对值  $|e_c(k)|$  间的二元连续函数关系  $f_1 = (|e(k)|, |e_c(k)|)$ 、 $f_2 = (|e(k)|, |e_c(k)|)$ 、与  $f_3 = (|e(k)|, |e_c(k)|)$ ，并根据不同的  $|e(k)|$ 、 $|e_c(k)|$  在线自整定参数、与的模糊控制器。一般情况下，在不同  $|e(k)|$ 、 $|e_c(k)|$  下被控过程对参数  $K_p$ 、 $K_i$  与  $K_d$  的自整定要求可归结为：

- 1) 当系统所受负载不大时，仅考虑  $e(k)$  的影响；
- 2) 当系统收到很大负载时，系统的  $e_c(k)$  会发生很大变化，因此需要考虑  $e_c(k)$  的影响。

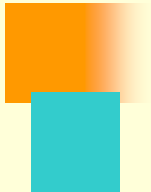
下面仅以  $e(k)$  影响进行分析：



(1) 当  $|e(k)|$  较大时，为使系统具有较好的跟踪性能，应取较大的  $K_p$  与较小的  $K_d$ ，同时为避免系统响应出现较大的超调，应对积分作用加以限制，通常取  $K_i = 0$ ；

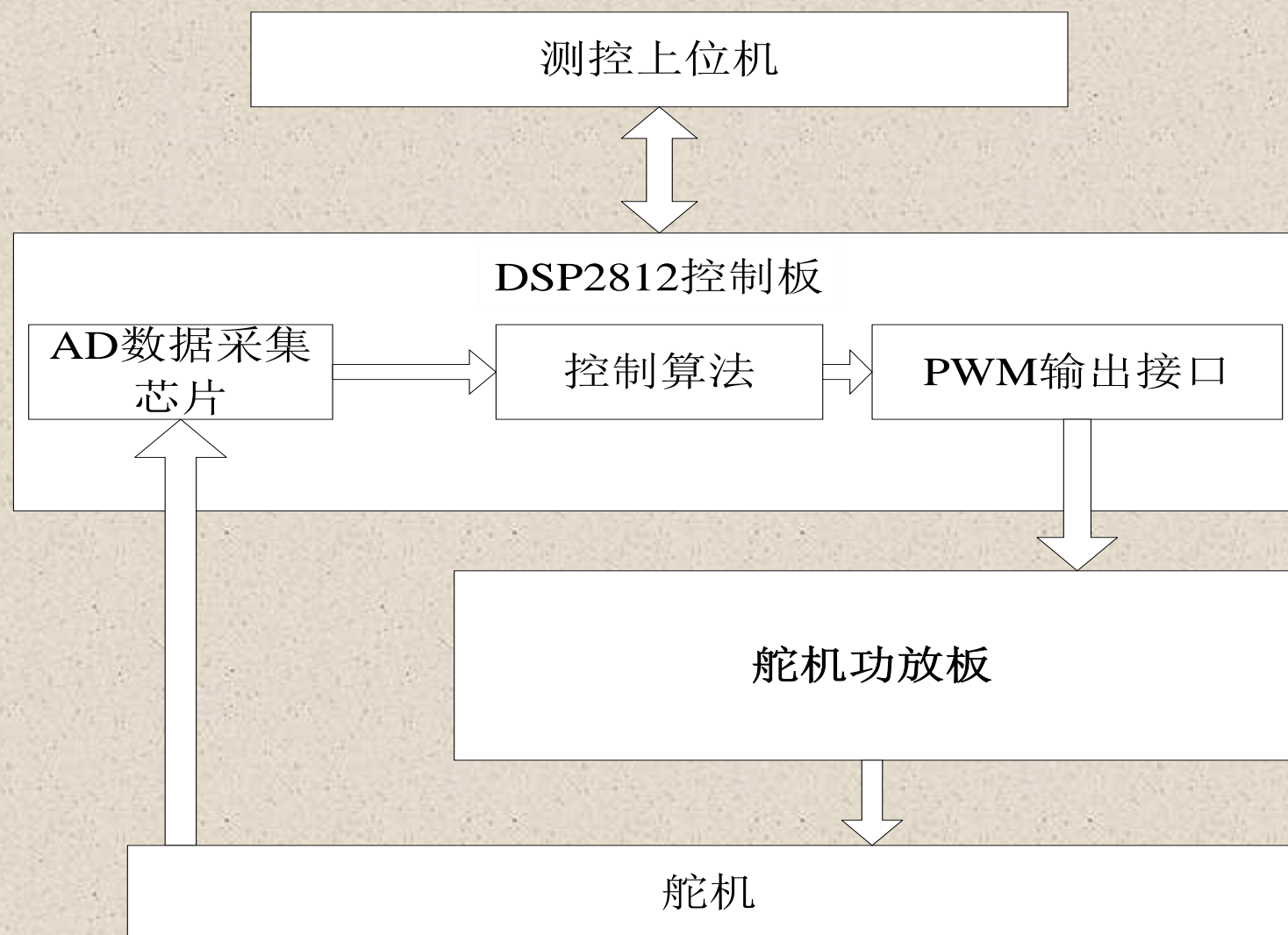
(2) 当  $|e(k)|$  处于中等大小时，为使系统响应应具有较小的超调， $K_p$  应取得小些。在这种情况下， $K_d$  的取值对系统响应的影响较大， $K_i$  的取值要适当；

(3) 当  $|e(k)|$  较小时，为使系统具有较好的稳态性能， $K_p$  与  $K_i$  均应取大些。为避免系统在设定值附近出现振荡， $K_d$  的选择是相当重要的。



思考题：当系统的负载变化后，应该怎样考虑  $e_c(k)$  对PID参数的影响呢？

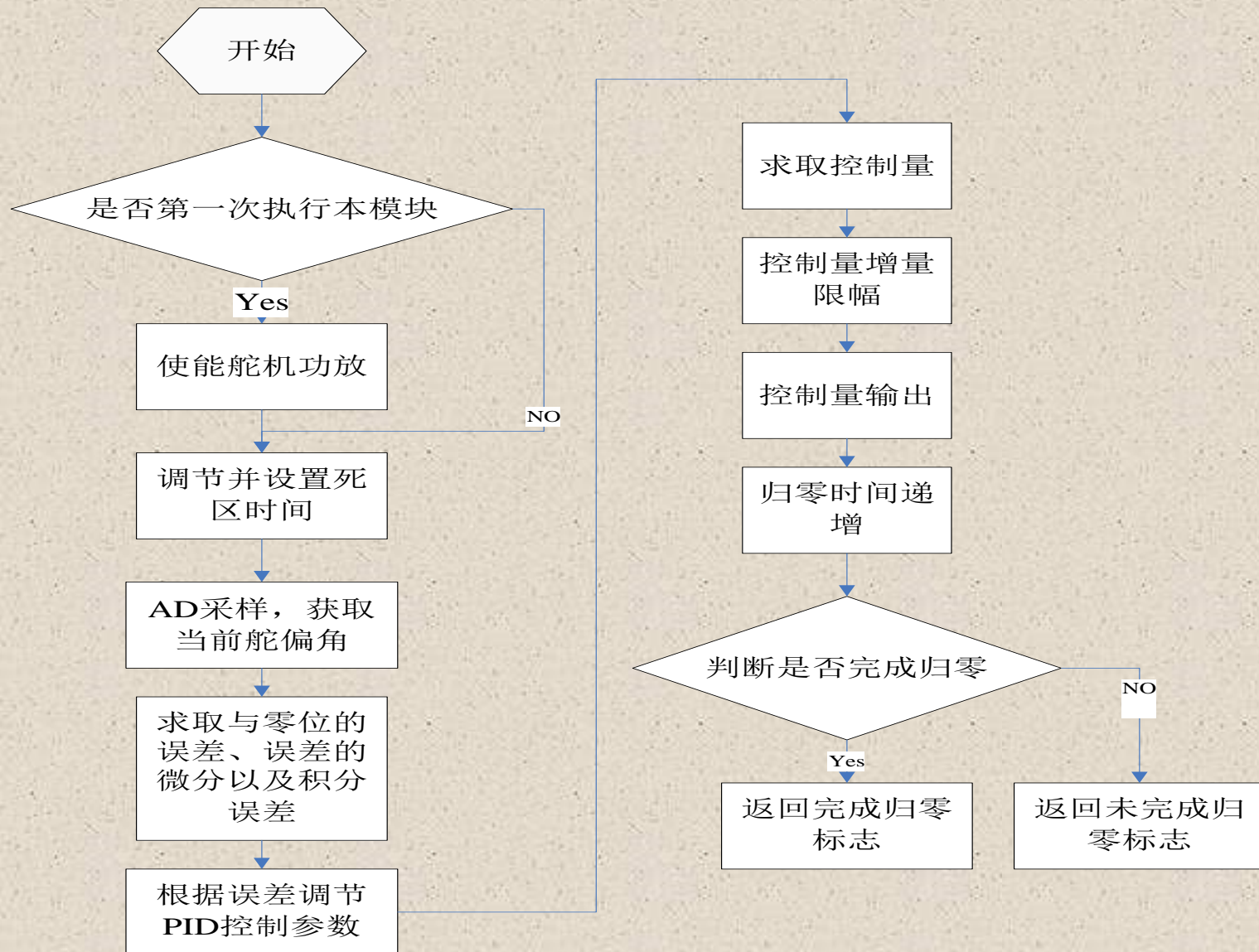
# 基于DSP2812的舵机系统硬件设计



数字化电动舵机的实现框图



DSP功能初始化模块：完成DSP系统时钟、定时器、寄存器、中断、A/D端口、PWM端口等功能的初始化。



# 基于DSP的数字化舵机系统原理样机试验

由于数学模型的建立、非线性因素的考虑可能存在的不全面性，以及电机的实际情况等因素，仿真与实际系统之间毕竟存在较大差异。在舵机系统硬件电路、软件程序综合调试完成后，可以利用设计的原理样机，测试系统的静态性能和动态性能，从而验证系统方案的可行性，以及数学模型与控制器设计的合理性。

# 采用经典PID控制器的系统试验



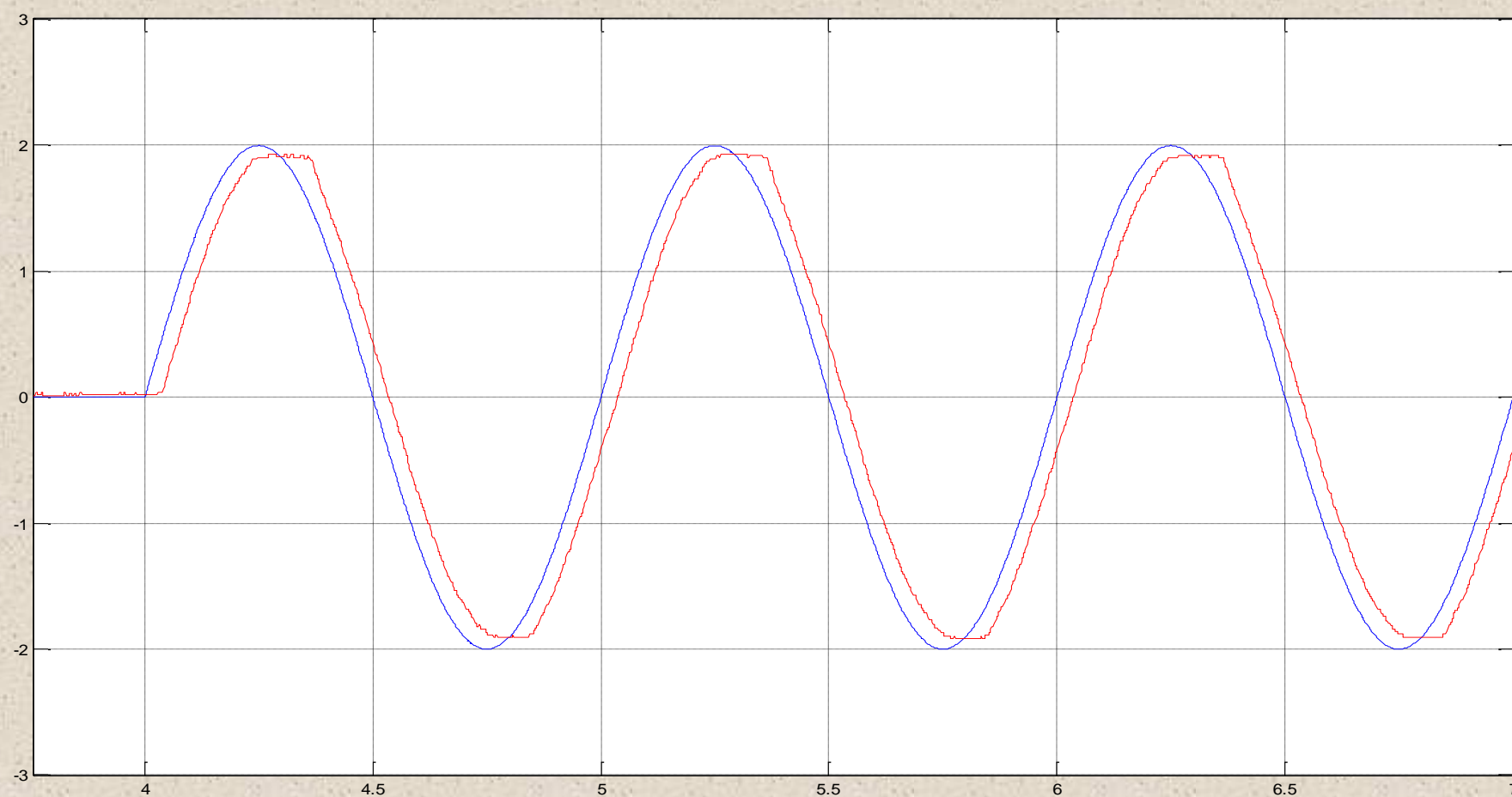
## 1.空载条件下的试验:

输入信号:  $\pm 20$ 度方波;

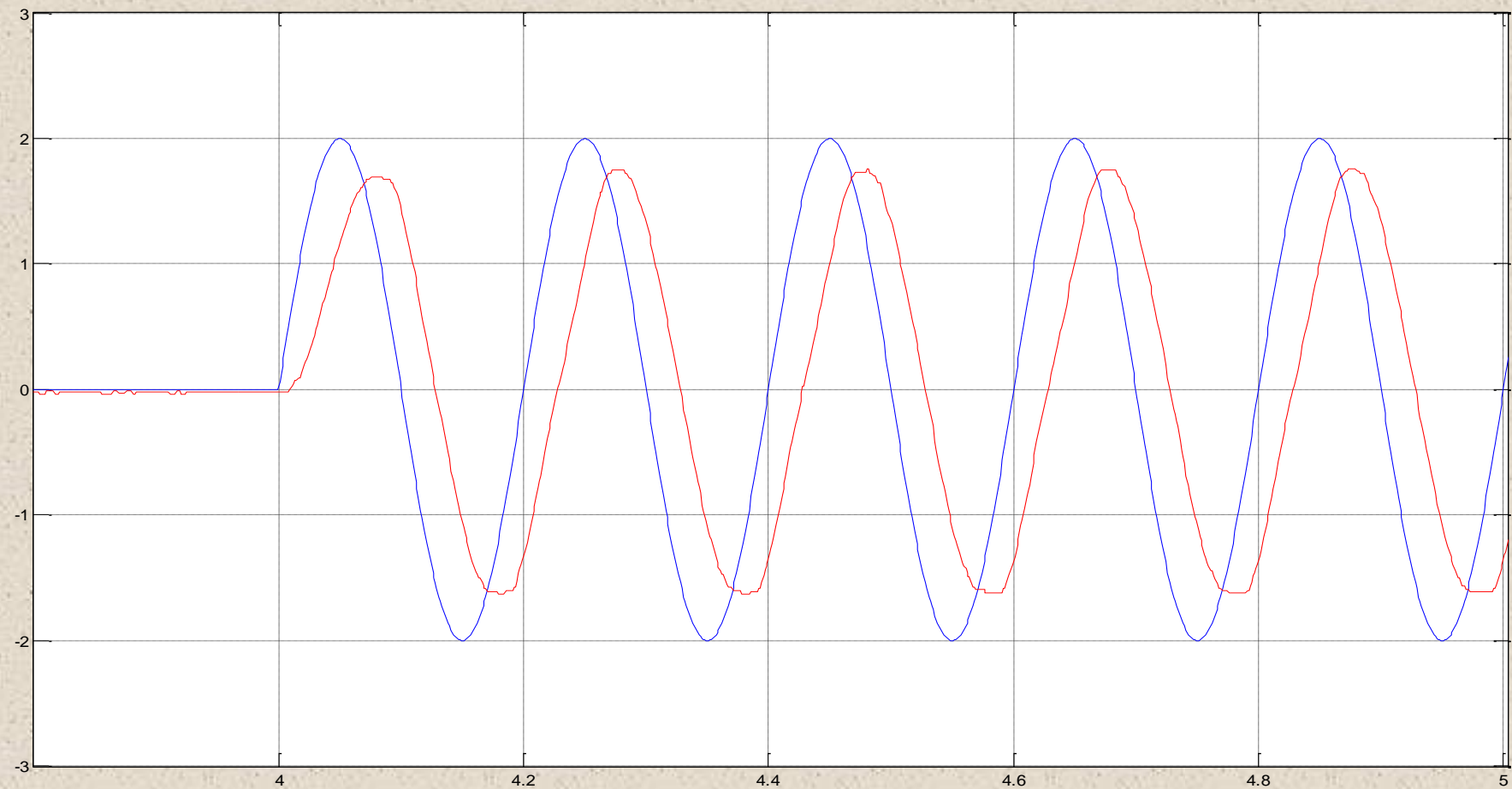
PID参数分别为:



输入信号：2度1Hz 正弦；  
PID参数分别为：

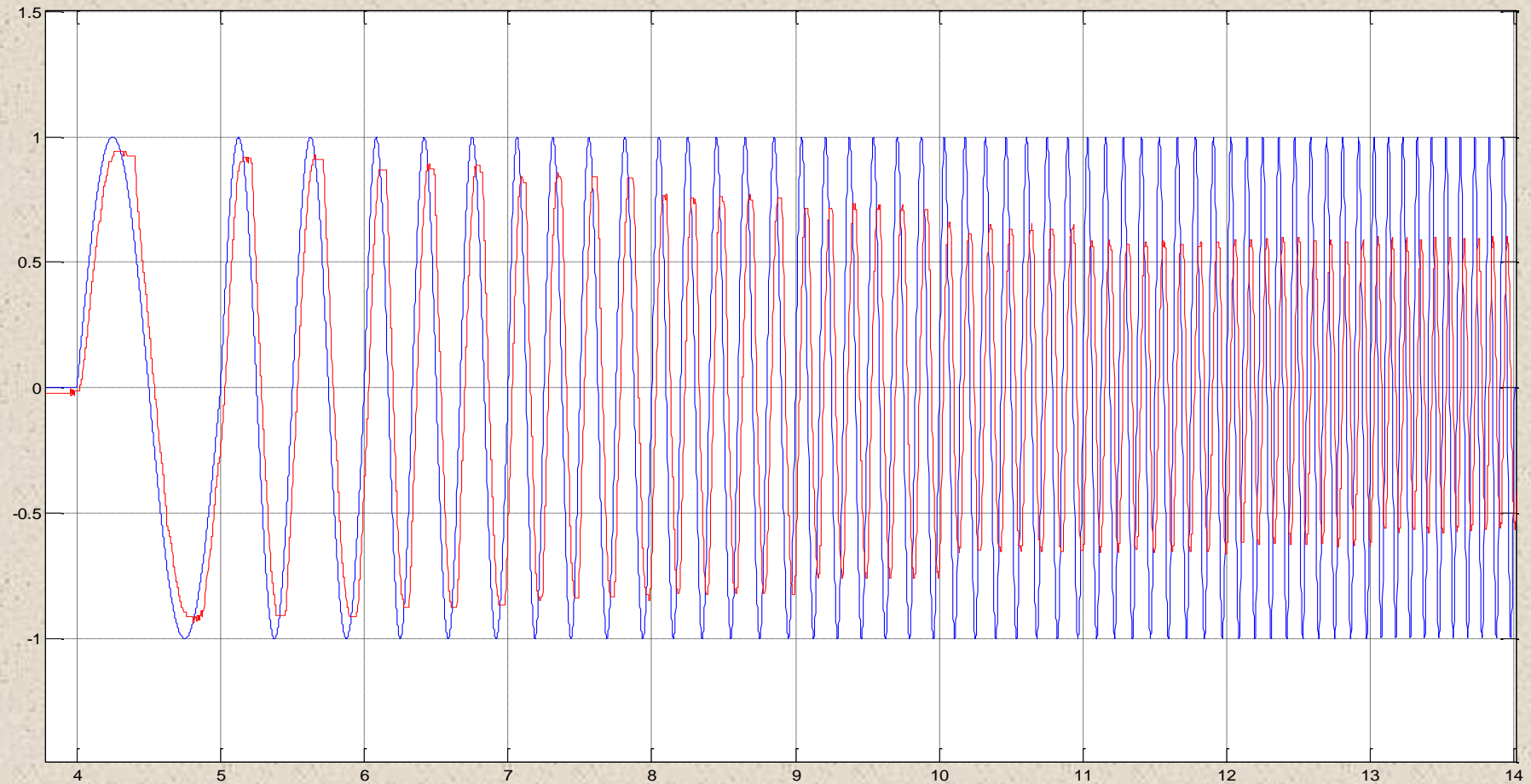


输入信号：2度5Hz 正弦；  
PID参数分别为：





输入信号：1度 1-10Hz扫频；  
PID参数分别为：



## 2. 带载条件下的试验:

输入信号:  $\pm 20^\circ$  方波;

负载: 负载电机加载电流0.4A, 折合扭矩47 N·m;

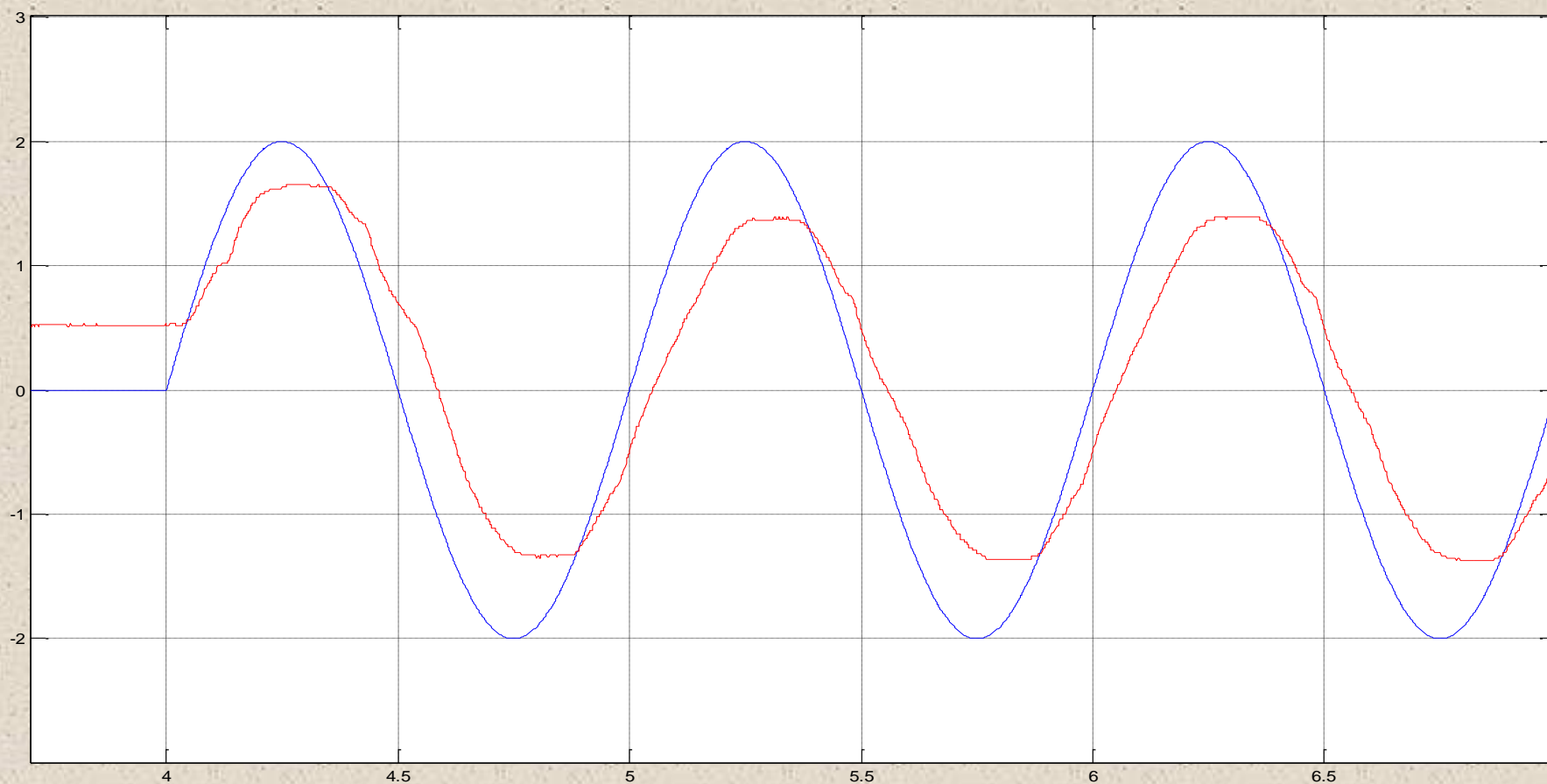
**PID**参数分别为:



输入信号：2度1Hz 正弦；

负载：负载电机加载电流0.3A，折合扭矩35 N·m

PID参数分别为：

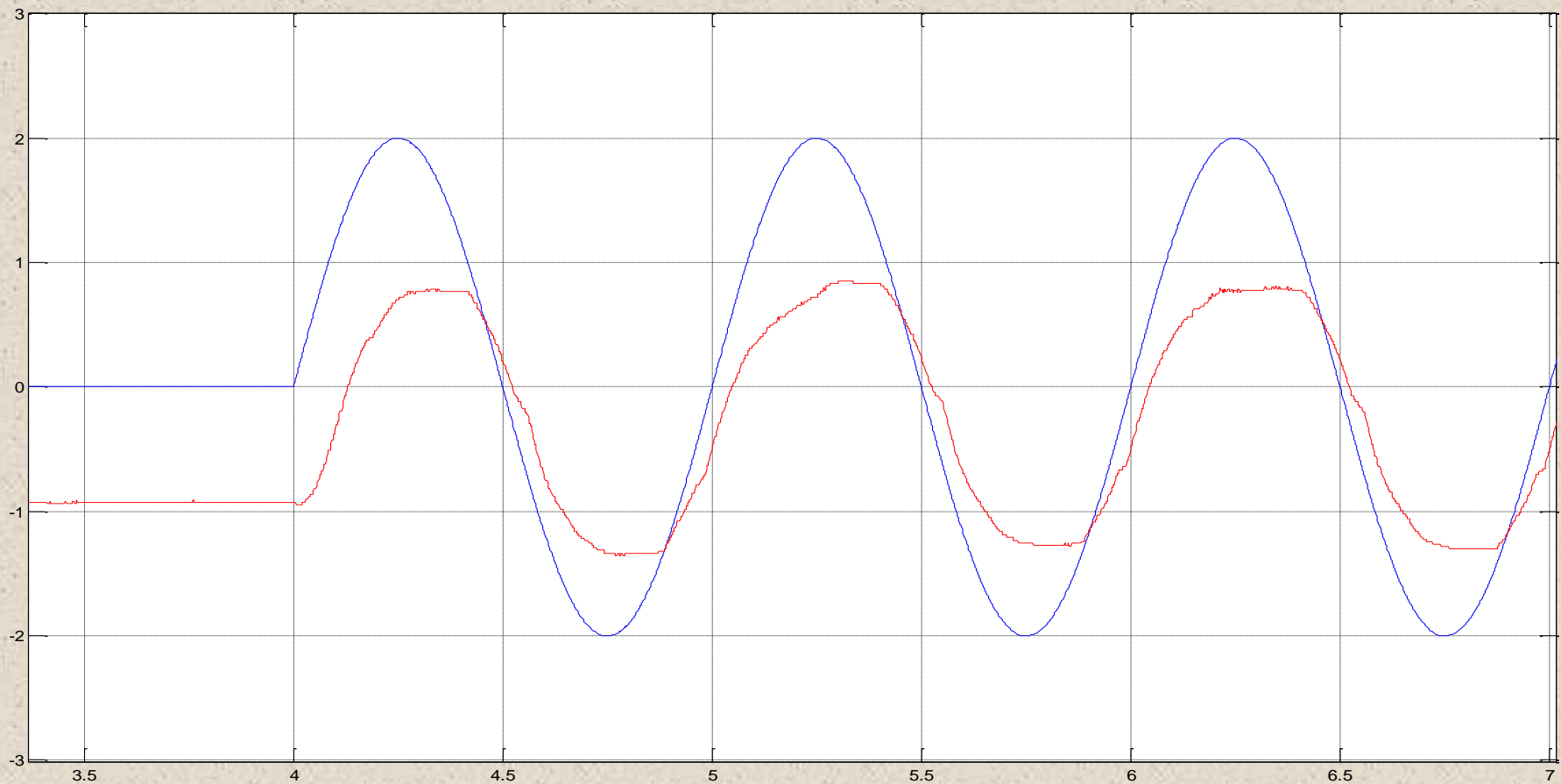




输入信号：2度1Hz 正弦；

负载：负载电机加载电流0.4A，折合扭矩47 N·m

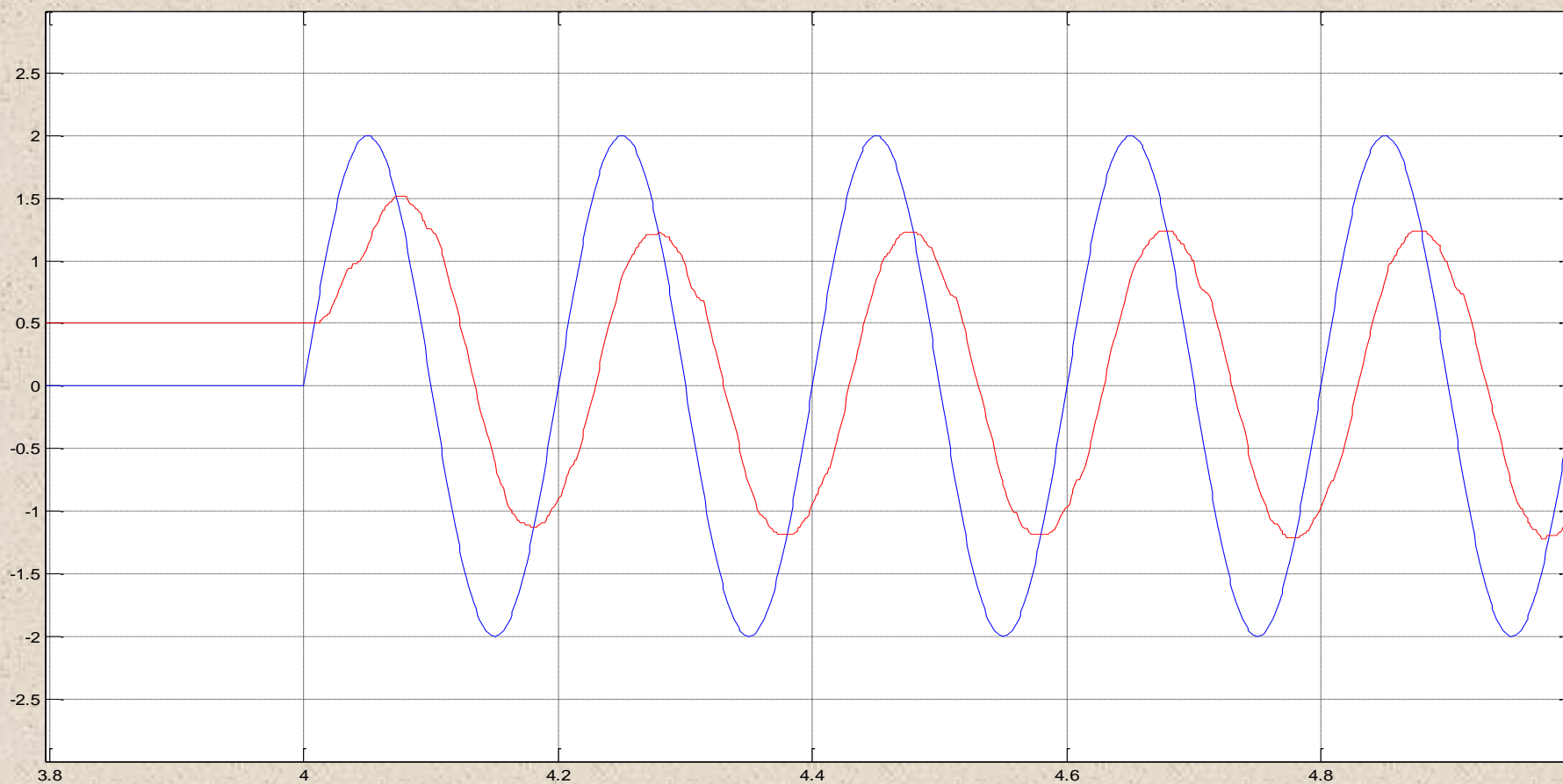
PID参数分别为：



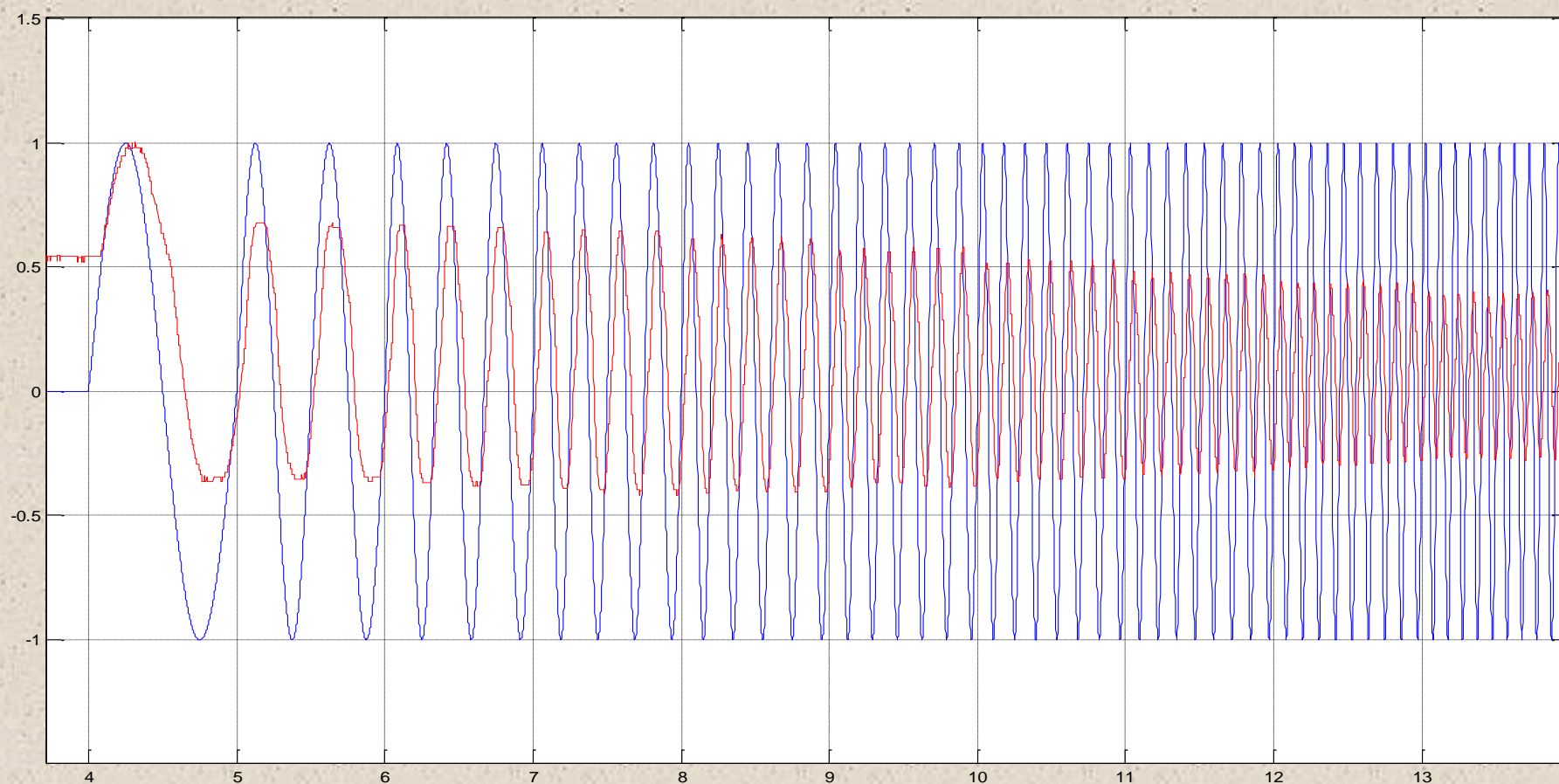
输入信号：2度5Hz 正弦；

负载：负载电机加载电流0.3A，折合扭矩35 N · m

PID参数分别为：



输入信号：以1度变化的 1-10Hz扫频；  
负载：负载电机加载电流0.3A ， 折合扭矩35N·m；  
PID参数分别为：

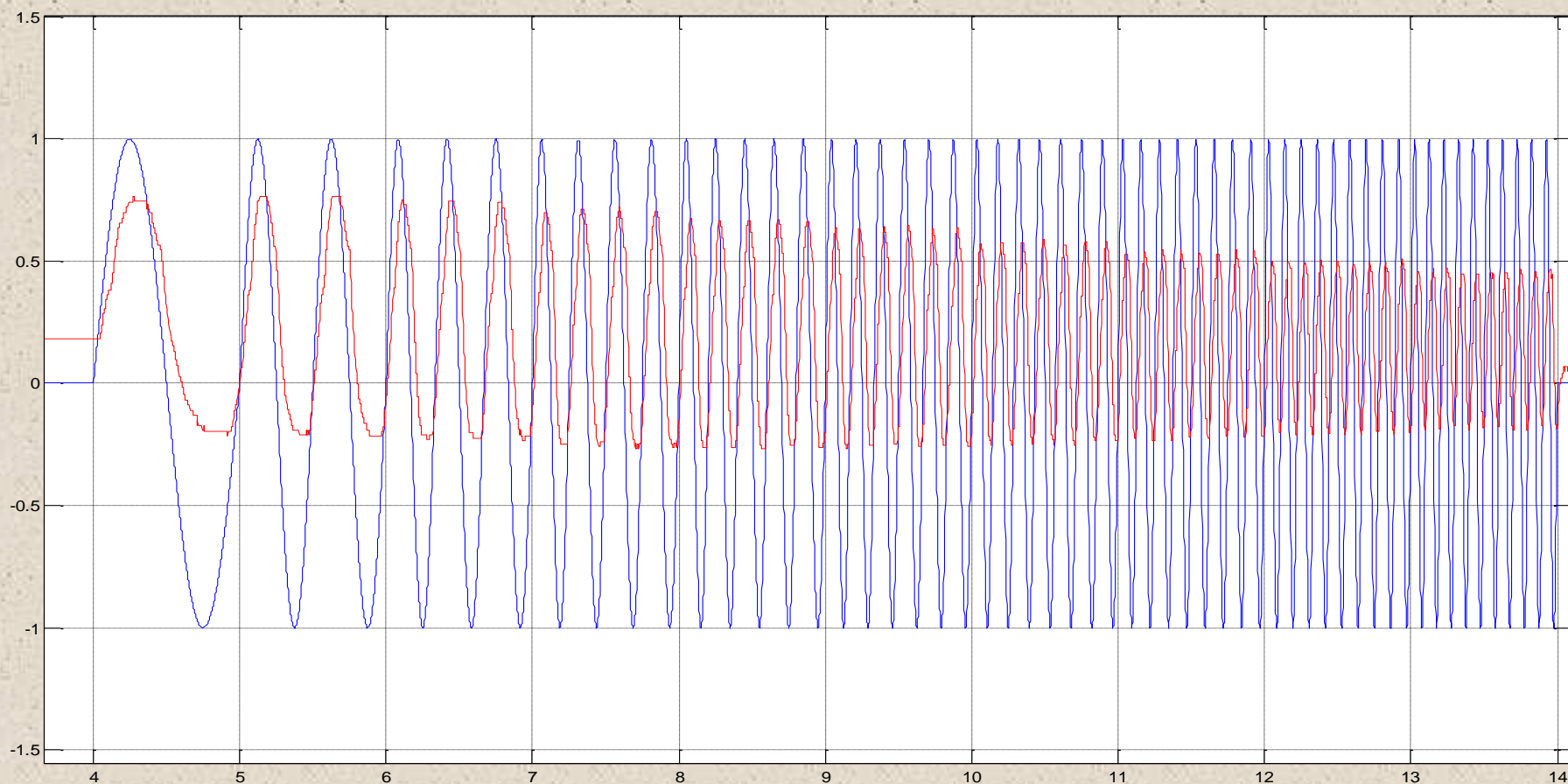




输入信号：1度 1-10Hz扫频；

负载：负载电机加载电流0.4A，折合扭矩47 N·m；

PID参数分别为：

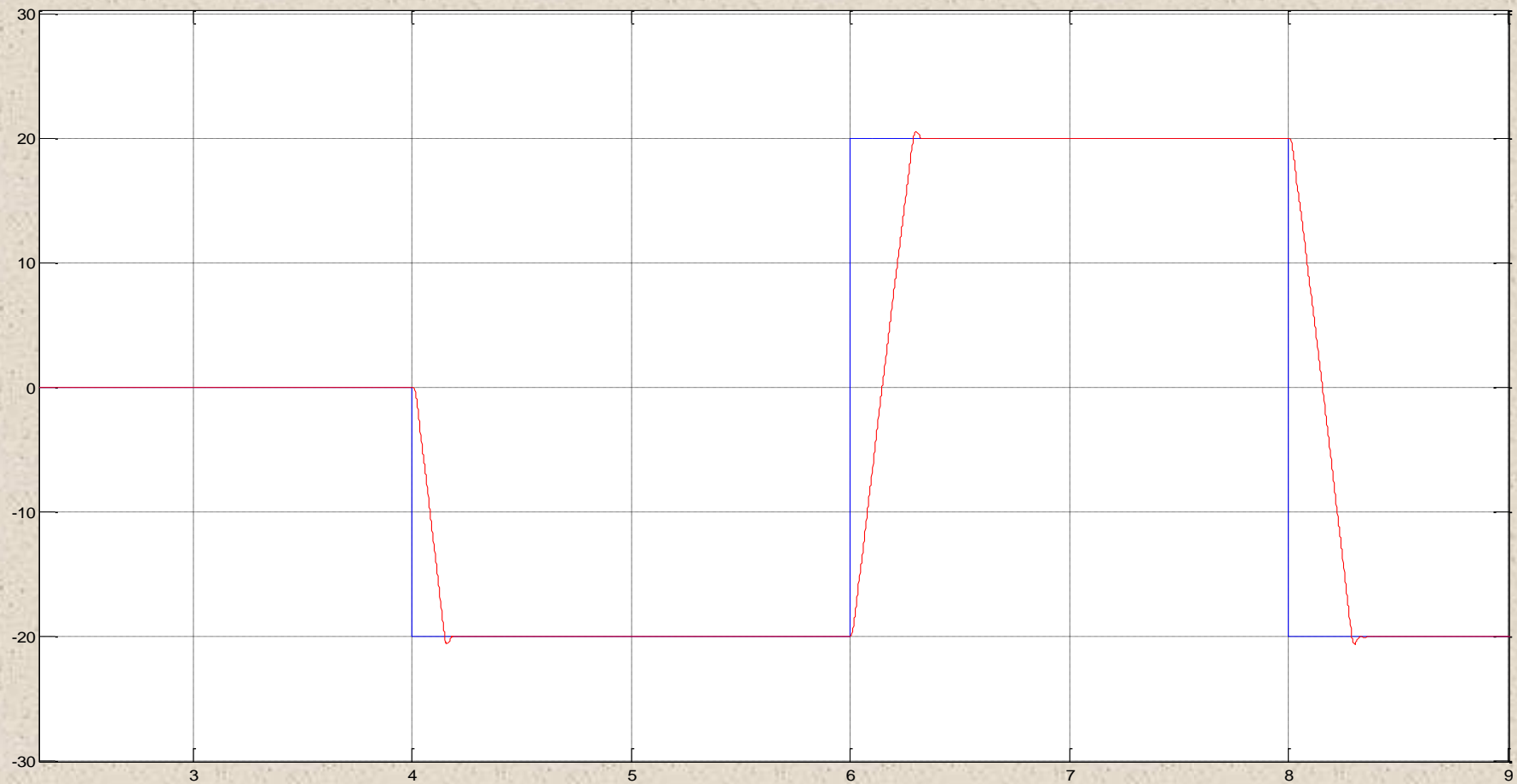


从上图可以看出经典PID控制器对于某一固定的载荷可以通过调节 $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , 参数达到需要的静态及动态要求。但是对于载荷在大范围变化的情况下经典PID控制器通过调节 $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 不能完全满足舵控系统的静态及动态要求。

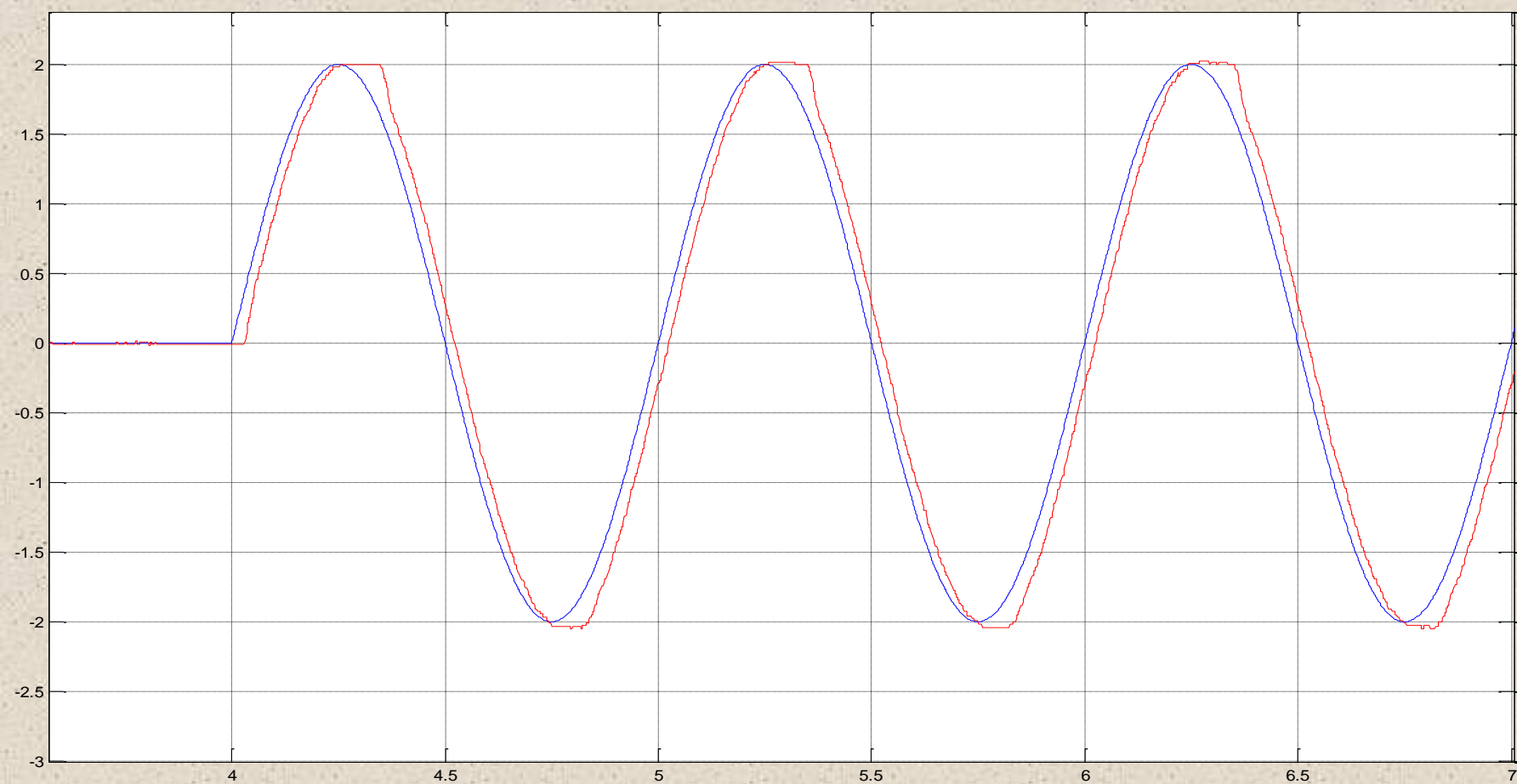
# 采用模糊控制PID控制器的系统试验



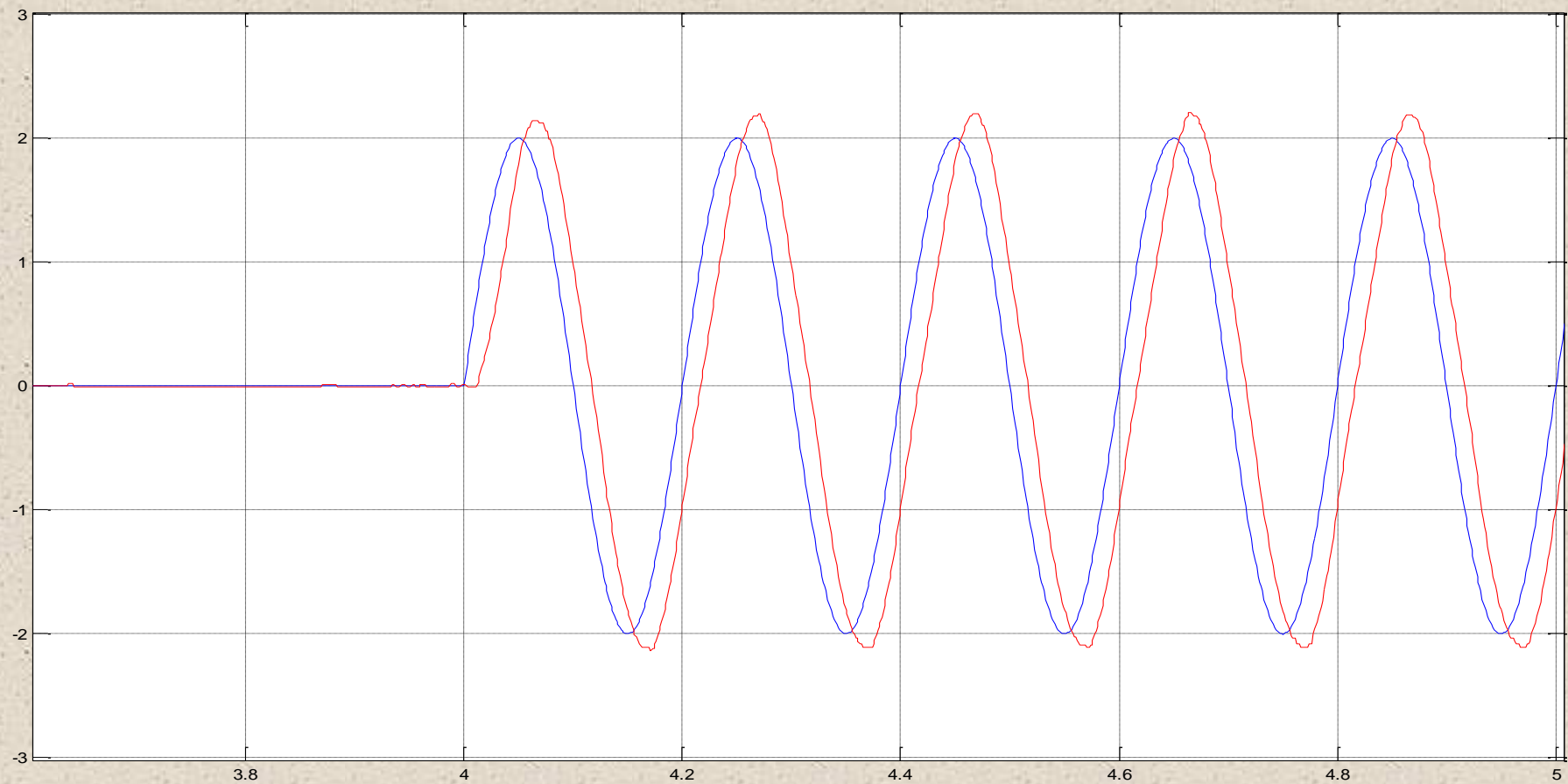
1. 空载条件下的试验：  
输入信号：  $\pm 20^\circ$  方波；



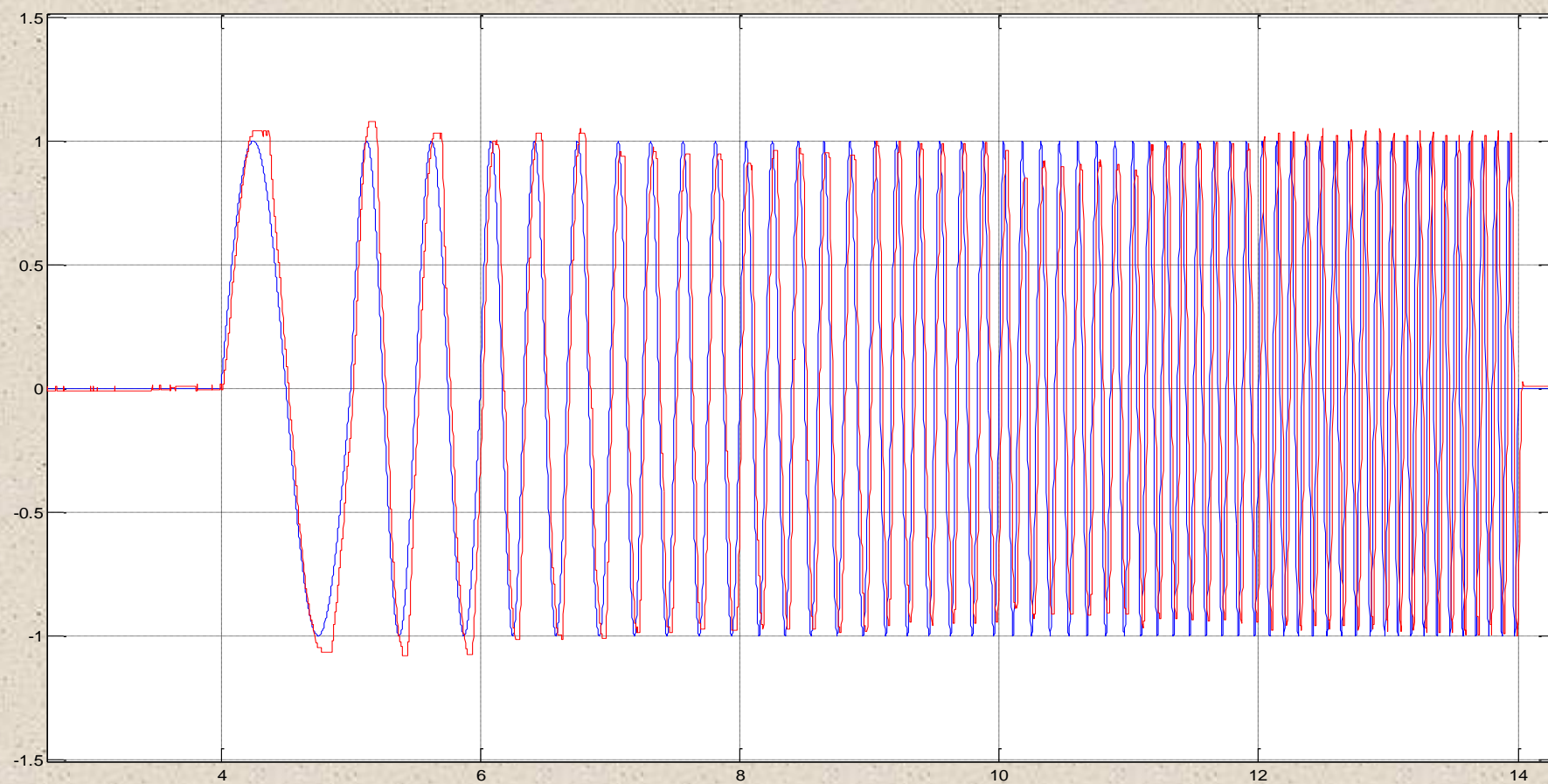
输入信号：2度1Hz 正弦；



输入信号：2度5Hz 正弦；



输入信号：1度 1-10Hz扫频；

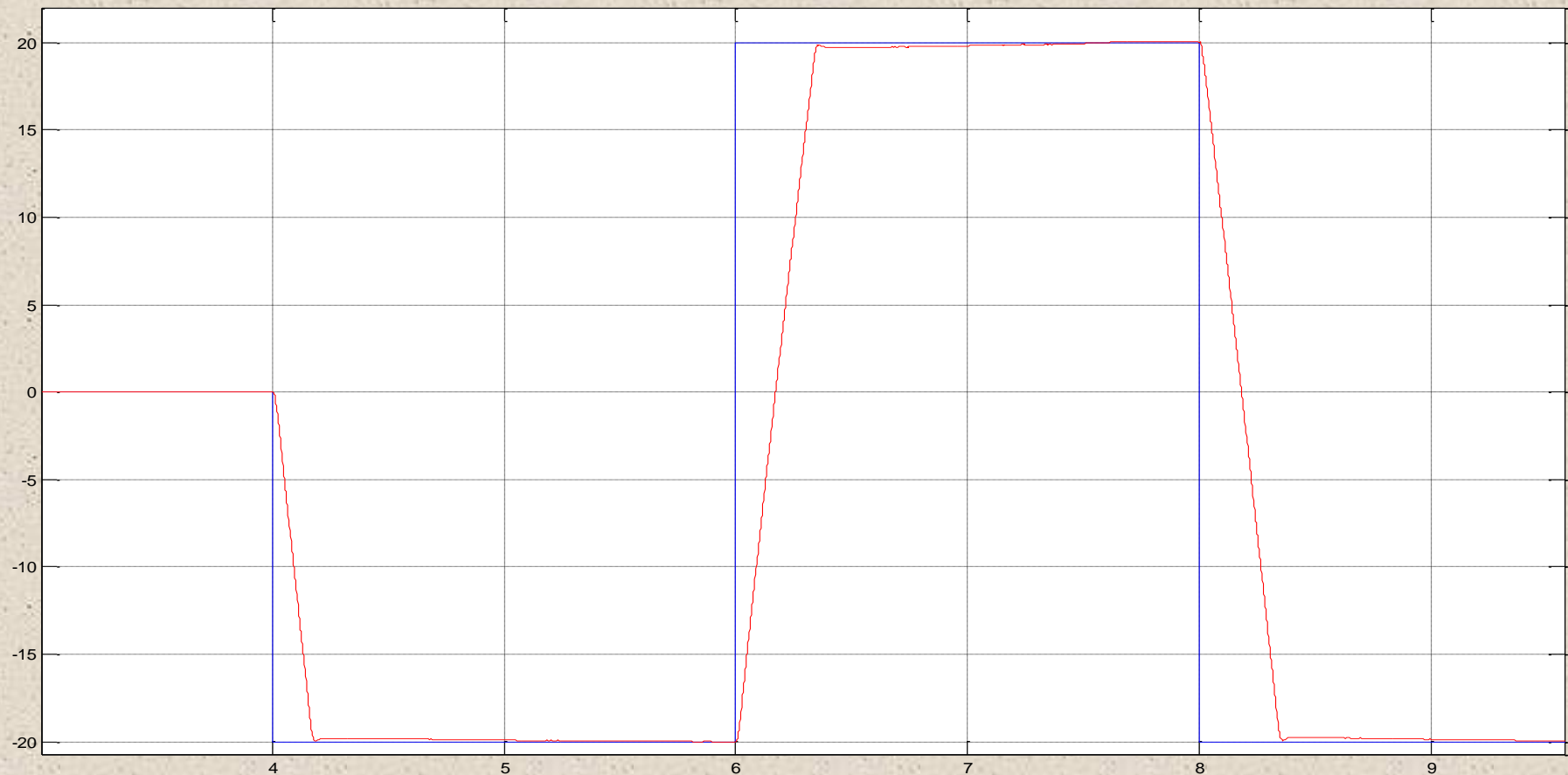




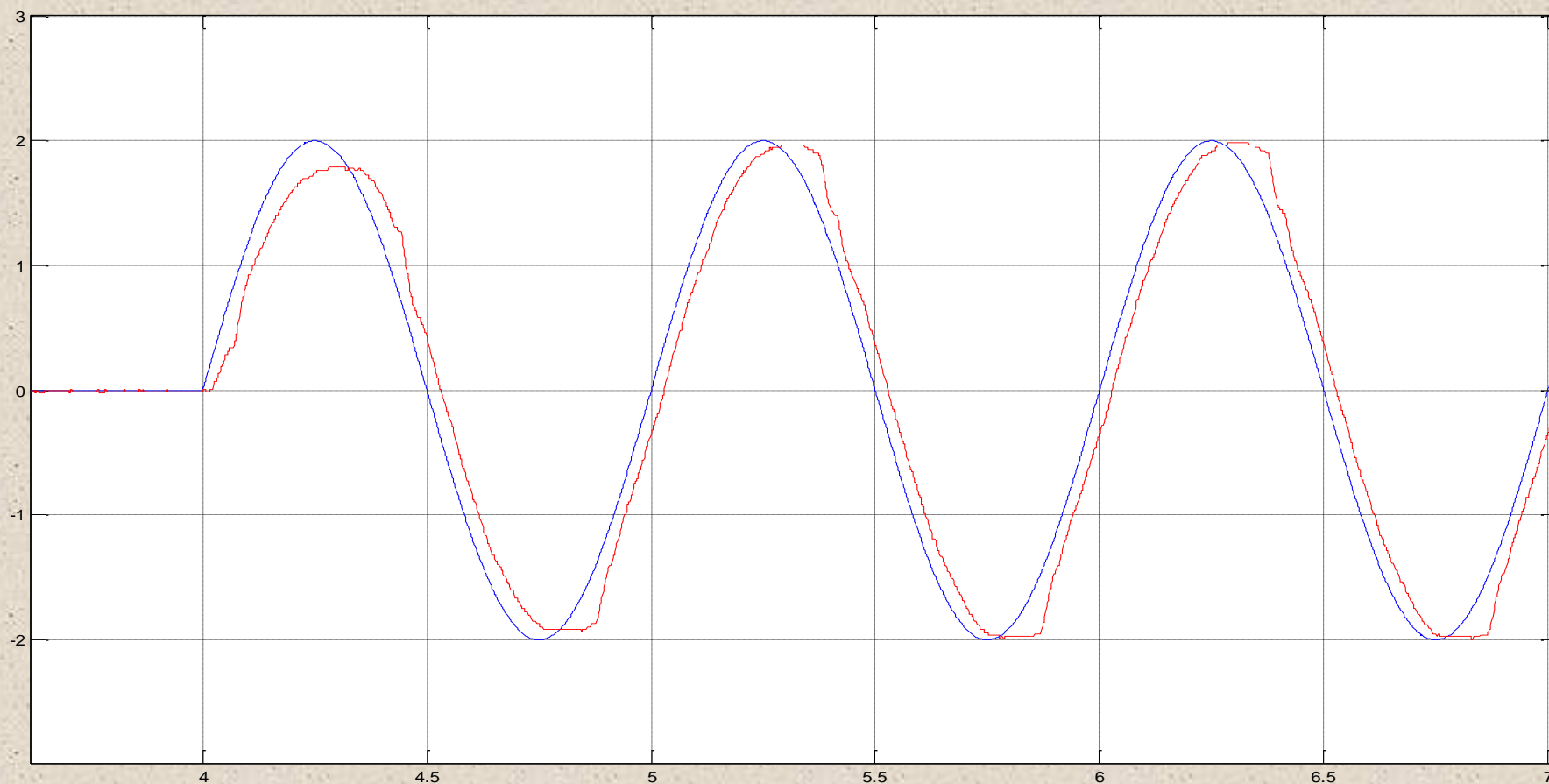
## 2. 带载条件下的试验

输入信号：  $\pm 20$ 度方波；

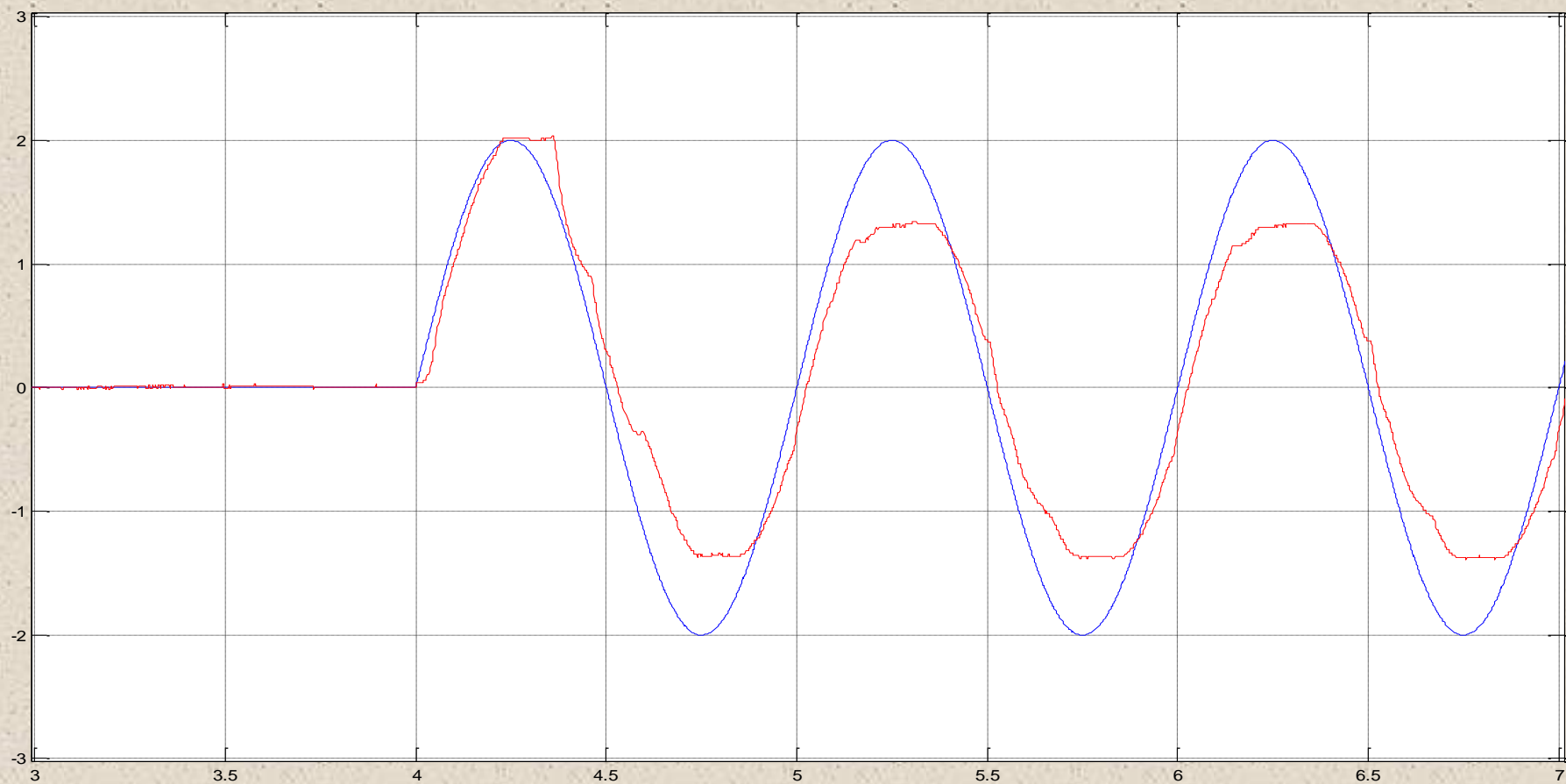
负载： 负载电机加载电流0.4A， 折合扭矩47 N·m；



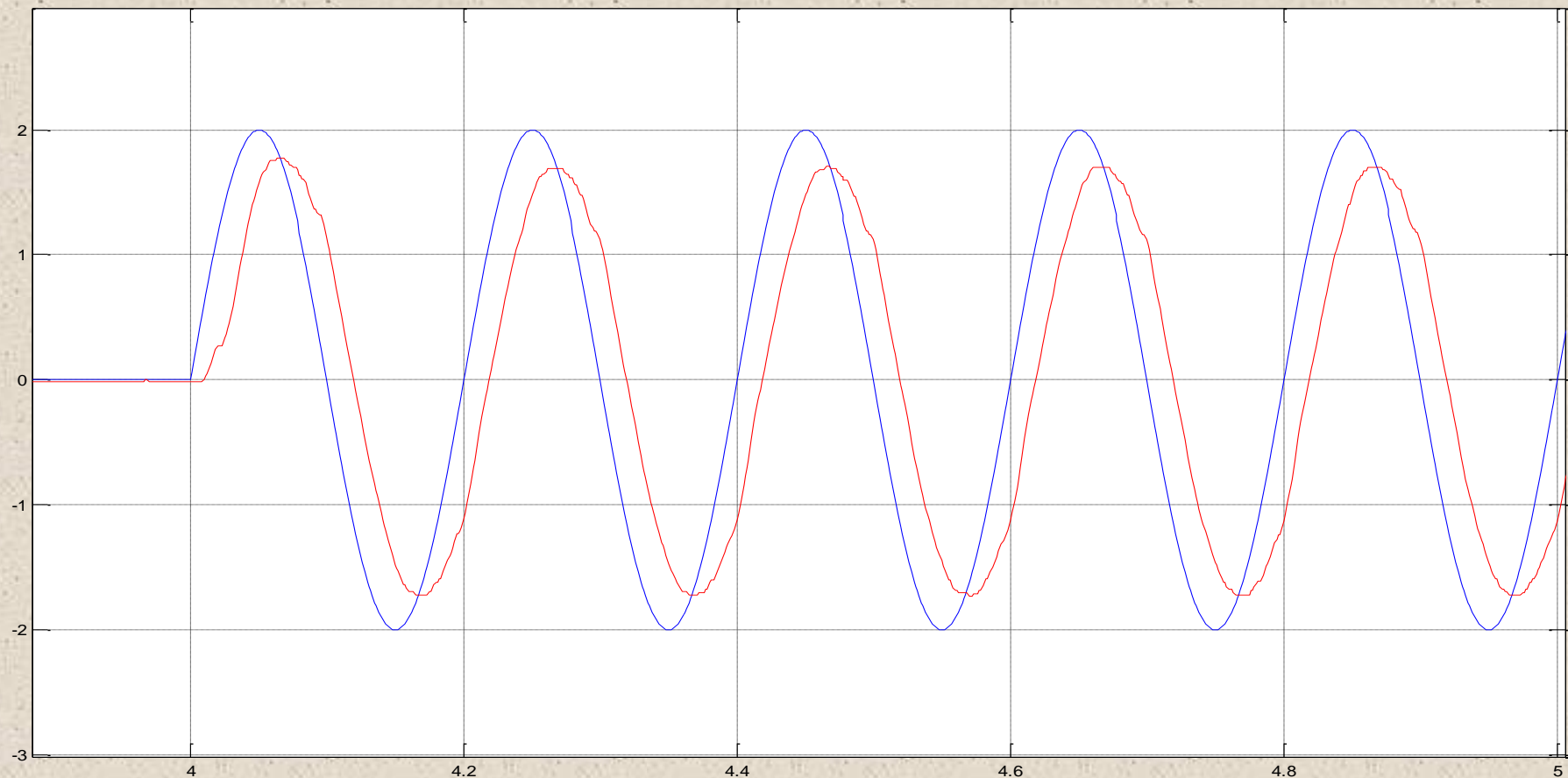
输入信号：2度1Hz 正弦；  
负载：负载电机加载电流0.3A，折合扭矩35 N · m



输入信号：2度1Hz 正弦；  
负载：负载电机加载电流0.4A，折合扭矩47 N·m

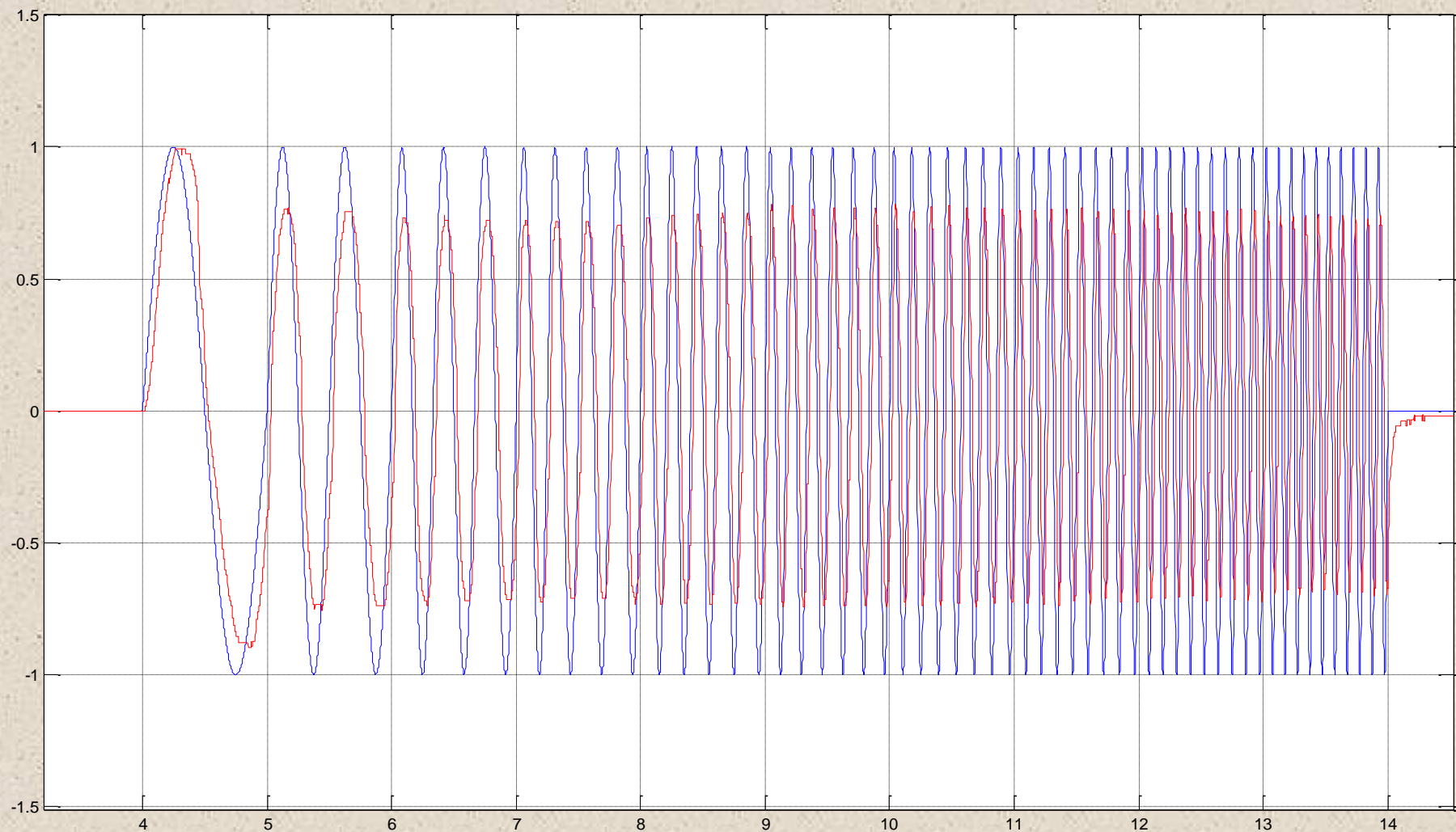


输入信号：2度5Hz 正弦；  
负载：负载电机加载电流0.3A，折合扭矩35 N · m



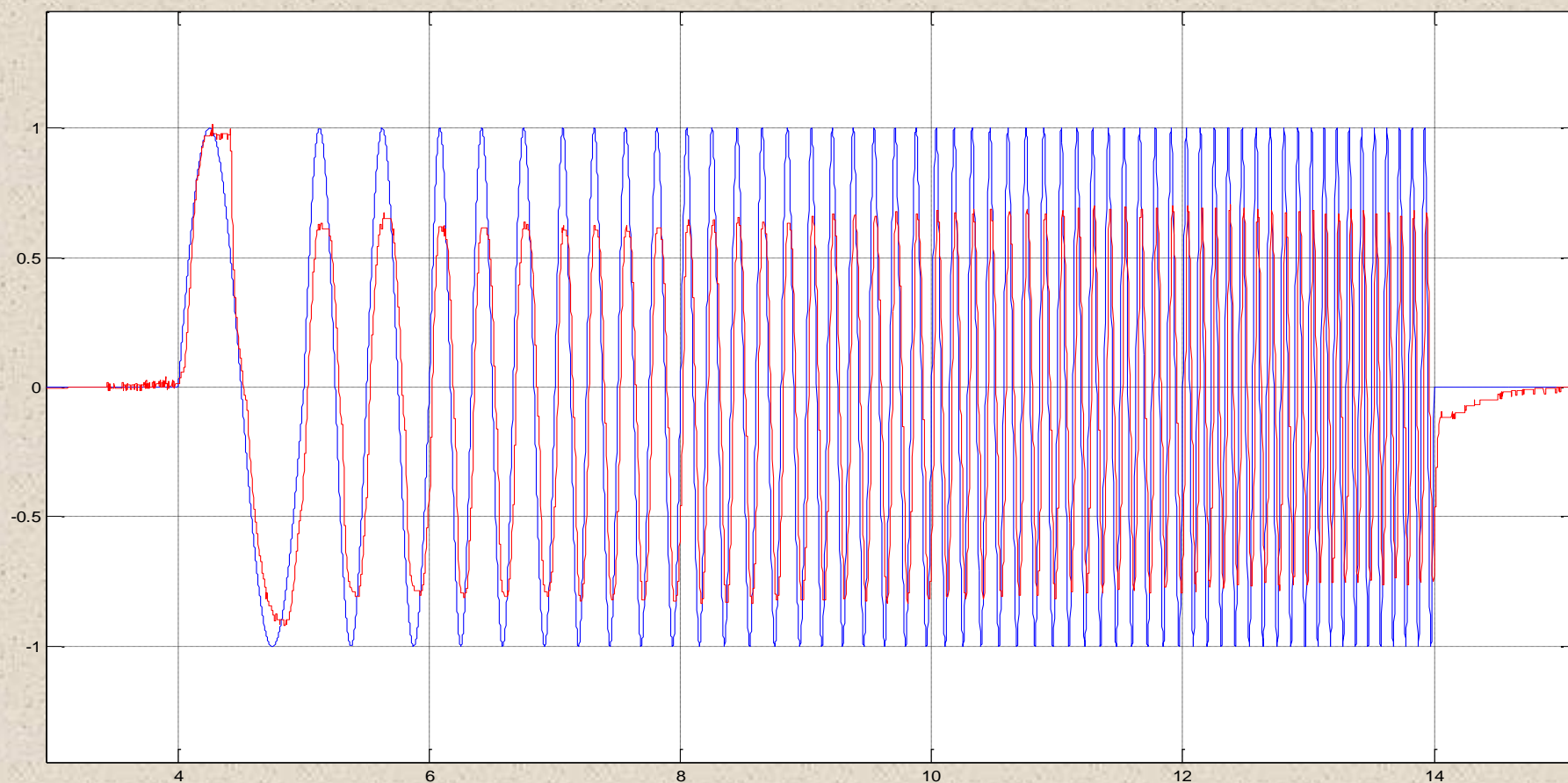


输入信号：以1度变化的 1-10Hz扫频；  
负载：负载电机加载电流0.3A，折合扭矩35N · m；



输入信号：1度 1-10Hz扫频；

负载：负载电机加载电流0.4A，折合扭矩47 N · m；



从上图可以看出模糊**PID**控制器对于载荷在大范围变化的情况下通过模糊控制算法对 $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 实时自动调节, 在满负载情况下能满足舵控系统的静态及动态要求。在超过最大负载情况下, 模糊**PID**控制器也能满足舵机控制系统的要求。

# 试验结果分析与对比

1. 空载条件下输入： $\pm 20$ 度方波信号可以看出对于空载条件下，2种算法对于方波信号响应均很好。满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID 控制器
上升时间(ms)	200	120
最大超调量(%)	0	0
稳态误差	0	0
稳态输出值	$\pm 20$	$\pm 20$



2. 空载条件下输入：  $\pm 2$ 度，1Hz的正弦信号可以看出对于空载条件下，2种算法对于正弦信号响应均很好。满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID 控制器
相移	18	13.5
稳态误差(%)	2.5	0
稳态输出值	$\pm 1.9$	$\pm 2.0$

3.空载条件下输入： $\pm 2$ 度，5Hz的正弦信号可以看出对于空载条件下，经典PID算法不能很好响应。模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID控制器
相移	36	13.5
稳态误差(%)	25	0
稳态输出值	$\pm 1.5$	$\pm 2.0$

4. 空载条件下输入： $\pm 1$ 度，1~10Hz的正弦变频信号可以看出对于空载条件下，只有模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID控制器
10Hz稳态输出值	$\pm 0.65$	$\pm 1$

5. 带载条件下输入： $\pm 20$ 度方波信号由图可以看出对于负载为 $47\text{N}\cdot\text{m}$ 的条件下。经典PID算法不能很好响应。模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID控制器
上升时间(ms)	250	350
最大超调量(%)	10	0
稳态误差(%)	15	0
稳态输出值	$\pm 18.5$	$\pm 20$



6. 带载条件下输入： $\pm 2^\circ$  1Hz 正弦信号由图可以看出对于负载为35N\*m的条件下。经典PID算法不能很好响应。模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID控制器
相移	18	9
稳态误差(%)	35	0
稳态输出值	$\pm 1.3$	$\pm 2.0$

7. 带载条件下输入： $\pm 2^\circ 1\text{Hz}$  正弦信号由图可以看出对于负载为 $47\text{N}\cdot\text{m}$ 的条件下。经典PID算法不能很好响应。模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID 控制器
相移	36	9
稳态误差(%)	60	30
稳态输出值	$\pm 0.8$	$\pm 1.4$

8. 带载条件下输入： $\pm 2$ 度5Hz正弦信号由图可以看出对于负载为35N\*m的条件下。经典PID算法不能很好响应。模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID控制器
相移	36	9
稳态误差(%)	60	30
稳态输出值	$\pm 0.8$	$\pm 1.4$

9. 带载条件下输入： $\pm 1$ 度1~10Hz正弦扫频信号由图可以看出对于负载为35N\*m的条件下。经典PID算法不能很好响应。模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID控制器
10Hz稳态输出值	$\pm 0.4$	$\pm 0.8$



10.带载条件下输入：1度1~10Hz正弦扫频信号由图可以看出对于负载为47N\*m的条件下。经典PID算法不能很好响应。模糊PID控制器满足系统要求。

性能	经典PID控制器	模糊控制PID控制器
10Hz稳态输出值	$\pm 0.38$	$\pm 0.75$

试验主要利用设计的原理样机，进行了舵机系统在两种控制器下的原理试验，测试了系统主要的静态性能和动态性能，并进行了对比。通过试验验证，得出：

经典PID校正能够减小系统的调整时间，减小超调拓宽系统的频带，但对减小系统稳态误差同时对于负载在大范围变化条件下能快速准确的跟踪响应并不十分有效。

模糊自整定PID校正增大了PID校正的参数增益，既起到了常规PID校正对系统动态性能的改善效果，又能够较快地、有效地减小系统的稳态误差，提高了抗力矩负载的能力，是一种更好地改善舵机品质的控制方案。