

开炼机电液伺服阀位置控制系统设计

第 1 章 绪论

1.1 设计背景

近年来,随着我国公路、汽车、交通运输事业的迅猛发展和人民物质生活水平的不断提高,轮胎产业一直处于高速发展的状态。轮胎制造企业在扩大生产规模的同时,不断更新生产工艺和配方,大大提高了子午线轮胎的节能、高速行驶安全性、舒适性和使用寿命。由于子午线轮胎胶料的硬度很高,一次炼胶量加大,在生产过程中对设备的承载能力也提出了更高的要求。而开炼机作为整条生产线前端设备,其性能的好坏直接关系到生产的连续性,对设备承载能力起决定因素的就是安全装置,它能保证设备在过载的情况下整机不受到损坏。

目前,在国内橡胶机械企业生产的各种规格开炼机中,大多采用传统的机械调距装置,其安全装置是通过铸铁安全片的破碎来起到安全保护的作用,而这种结构的安全片更换时间较长,严重地影响了生产的连续性,在实际生产中还存在以下缺陷:

- (1)调距精度较差。
- (2)双侧调距的同步性较差。
- (3)设备的安全保护压力值控制不准确。
- (4)对操作者的人身安全保护不够。

1.2 液压伺服系统概述^[1-3]

液压伺服控制系统,是一种以液压动力机构作为执行机构并具有反馈控制的系统。它不仅能够自动、准确而快速地复现输入量的变化规律,而且还能够对输入信号实现放大与变换的作用。电液伺服系统是-新兴的科学,发展历史并不太长。它是在 20 世纪 50 年代至 60 年代以后逐步发展起来的,并形成了一门学科,它综合了电气和液压两方面的特长,具有控制精度高、响应速度快、输出功率大、

信号处理灵活、易于实现各种参量的反馈等优点，其应用已遍及国民经济和军事工业的各个技术领域。远在第一次世界大战前，液压伺服曾用于海军舰艇中作为操舵设备，但是因当时电力系统的迅速发展及其显示出的明显优越性，动摇了液压控制的基础。近几十年来，由于整个工业技术的发展，尤其是在军事航空和宇航技术上所应用的伺服控制系统逐步向快速、大功率、高精度的方向发展，电液伺服控制得到了迅速发展。

今后，液压伺服控制的发展大体有以下几个方面：

(1)高压大功率。高压的目的主要是为了减轻系统的重量及结构尺寸大功率是为了解决大惯量与重负载的拖动问题。高压与大功率系统的研究与应用对航空与航天技术尤其显得重要。

(2)高的可靠性。液压控制设备一般都是高性能的机器，对油的污染和温度变化都很敏感，例如把这种机器应用于飞行器上，可靠性就是一个重要课题。为了提高可靠性，除了要对机器本身的研究与改良以及增加检测与诊断技术外，目前正在采用裕度技术和重构技术。

(3)理论解析与特性补偿。液压伺服控制的理论解析近期的研究倾向是利用计算机对复杂系统(如多变数液压系统)和复杂因素(非线性及时变等)进行仿真分析的研究，其中大量的研究是围绕动态特性进行的。随着系统应用目的的多样化，控制对象也愈来愈复杂，大惯量、变参数、非线性及外干扰是经常遇到的。要使这些系统具有满意的性能必须研究系统的性能，需要研究系统的性能补偿与控制。

(4)同微型机的结合。目前液压控制已从模拟控制转为以微机控制与数字控制为主，把微机放入控制回路之内进行实时控制时就有很多问题需要研究，这方面存在着计算机速度问题、电液伺服机构与计算机配置的问题以及离散化带来的一些问题。直接与数字机结合需要发展液压数字技术，目前已产生了各种形式的数字阀、数字缸及高速开关阀等。利用计算机可以进行更复杂的功能控制。电液伺服控制与计算机的结合，提供了计算机技术与大功率压伺服控制之间牢固的、精确的、高性能的联系，产生了各种所谓智能化的电气液压伺服控制系统。

(5)液压伺服控制普遍的工业应用阶段。液压伺服控制元器件的批量及规格化生产降低成本或开发简易廉价的各种转换元件、数字化元器件以及各种抗污染元器件，仍然是今后液压伺服控制技术研究的课题。

第 2 章 控制系统的设计

2.1 控制系统的技术要求及性能参数

开炼机(由 660×2130)液压调距系统的控制技术要求和性能指标为:

(1)调距最大行程 L 。100mm

(2)位置调节时域动态指标:

$t_r < 0.02s$

$\sigma_p < 5\%$

$t_s < 0.1s$

(3)位置调节频率动态指标:

$K_s > 6.8dB$

400–700

(4)性能指标:

2.2 液压系统参数及主要元件的选择如下:

(1) 选取 SHT 公司生产伺服油缸, 型号: FB335 X 200X 100ST。

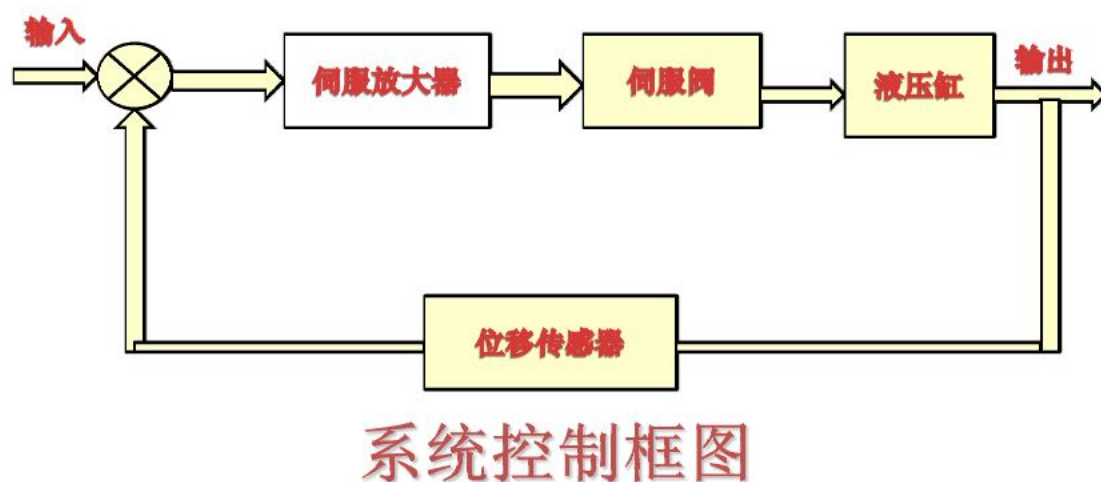
(2) 选用 M00G 公司的 G761-3003 型伺服阀。

$\omega_h = 700 \text{rad/s}$

(3) 位移传感器选择 MTS 公司生产的磁致伸缩位移传感器, 型号为:

GHM-0100M-D60-1-A0。

2.3 系统的数学模型



(1) 液压缸负载的传递函数 (由液压缸的参数计算得)

$$G_h(s) = \frac{13.8}{1.33 \times 10^{-6} s^3 + 4.62 \times 10^{-4} s^2 + s} \quad (2.3.1)$$

(2) 伺服阀的传递函数

$$G_v(s) = \frac{2.25 \times 10^{-2}}{\frac{s^2}{700^2} + \frac{1.4}{700} s + 1} \quad (2.3.2)$$

(3) 位移传感器的增益

$$K_f = 160 \text{ mA} / \text{m} \quad (2.3.3)$$

(4) 伺服放大器的传递函数 (由行程位置的最大允许误差可得)

$$K_a \geq 0.48 \quad (2.3.4)$$

2.4 系统仿真分析

Matlab 的构件 Simulink 直接对动态系统模型仿真，并且其图形化设计界面使得建立系统模型的工作更直观和方便。它是一个用于动态系统建模、仿真和分析的软件包，它可以完成连续、离散和混合的线性或非线性系统的仿真，也能完成多种采样数率的系统仿真。Simulink 为用户提供了用方块图进行建模的图形接口，与传统仿真软件包用微分方程和差分方程建模相比，具有更大的优势，它不

但可以用于系统仿真、分析和设计，也实现了与 Matlab, C 或者 Fortran 甚至硬件之间的数据传递，大大地扩展了其功能。在数字仿真方面，Simulink 给出了多种仿真算法。

本课题针对开炼机液压调距系统的液压缸位移输出进行仿真分析，所建立的系统 SIMULINK 仿真框图如图 2.1 所示。

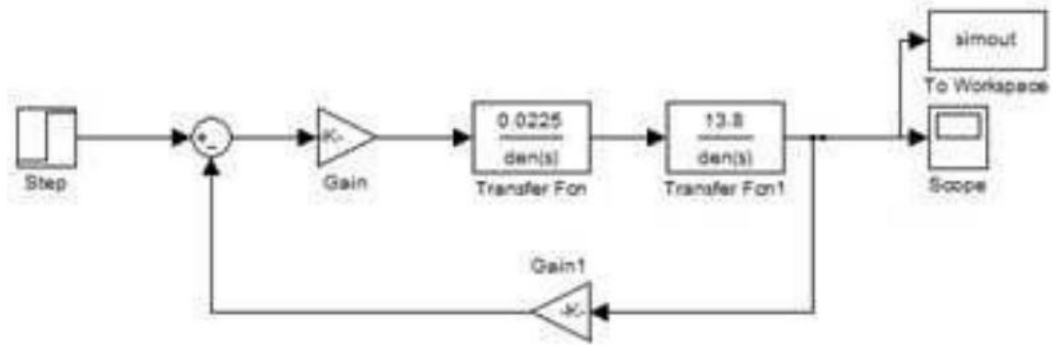


图 2.1 电液伺服阀位置控制系统仿真框图

$K_g=27.4\text{dB}$ ，相位稳态裕量 $r=86.60$ 。由闭环系统阶跃响应图 2.3，可得到系统响 $t_r=0.0863\text{s}>0.02$ ，调节时间 $t_s=0.157\text{s}$ ，不能满足系统要求，必须对系统进行校正。

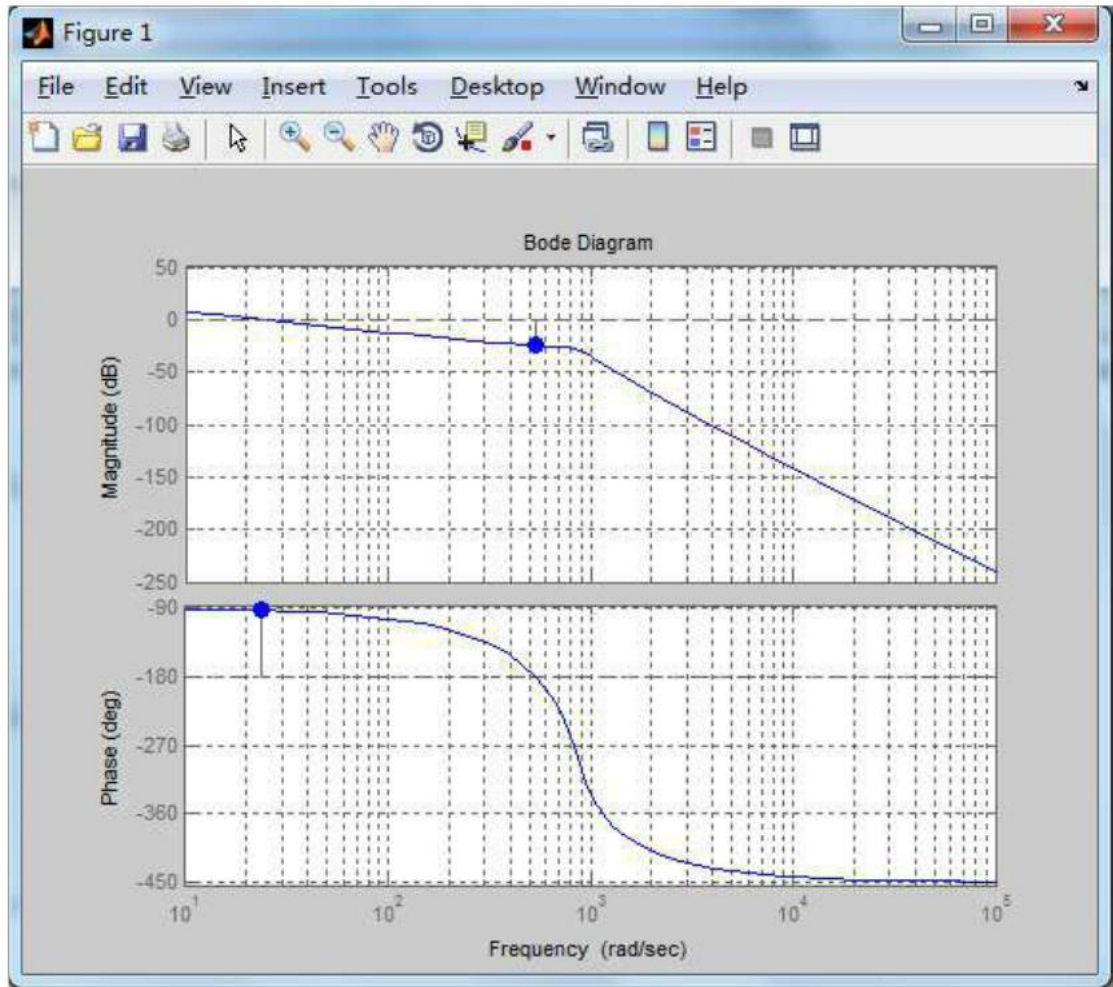


图 2.2 Bode 图

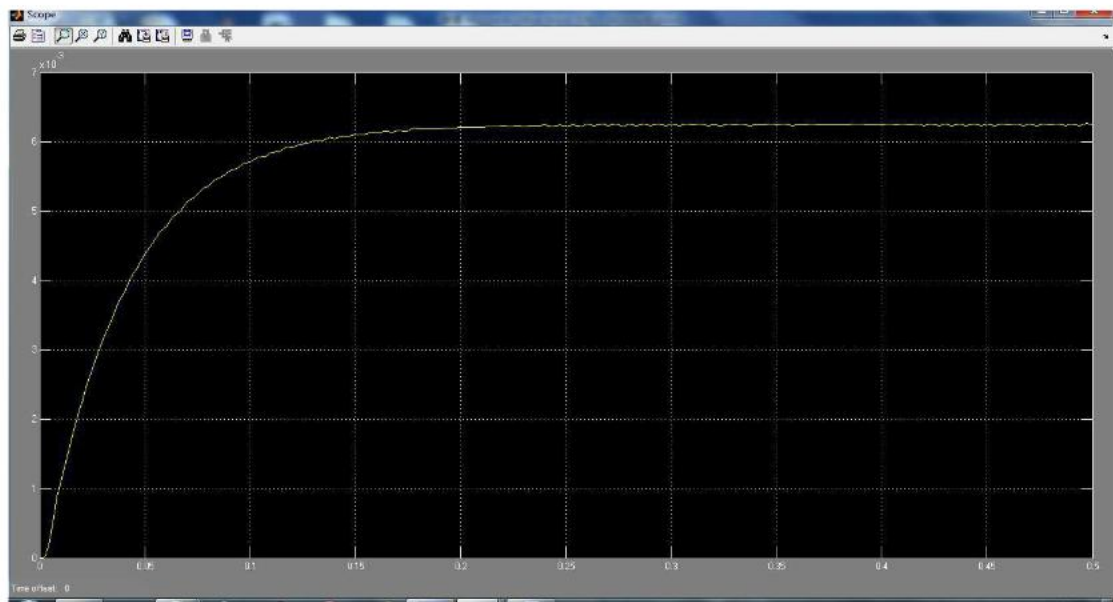


图 2.3 系统的闭环阶跃响应图

第3章 电液伺服位置系统的PID校正

通过对开炼机电液位置伺服系统的静、动态特性的分析可知,系统的快速响应无法达到设计要求,必须在控制系统中加入校正装置。一般常用的校正策略有串联校正、并联校正、复合控制校正和PID校正等。串联校正:将校正装置与原系统的前向通道的元件相串联,其校正装置简单,调整方便,但经常需要对信号进行隔离与提高增益,系统中其他元件特性参数的变化将会严重影响校正结果。并联校正:校正装置与原系统中部分环节相并联,形成一个局部反馈回路。与串联校正装置相比较,并联校正可抑制被校正装置反馈所包围回路的元件参数变化的影响,但其结构复杂,调整相对麻烦。复合控制校正:在反馈控制系统中加以顺馈控制和反馈控制相结合的校正方法,该方法结构复杂,成本较高。在工程实际中,应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制,即PID控制。在控制理论和技术飞速发展的今天,工业过程控制中95%以上的控制回路都具有PID结构,并且许多高级控制都以PID控制为基础。在开炼机液压控制系统中,根据前面建立的数学模型,选择使用PID控制策略来改变系统性能。

3.1 PID控制器概述

PID控制器由比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)组成。在控制系统的设计与校正中,PID控制规律的优越性是明显的,它的基本原理却比较简单。

基本的PID控制规律可描述为:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.1)$$

PID控制器用途广泛,使用灵活,已有系列化产品,使用中只需设定三个参数即可。在很多情况下,并不一定需要三个单元,也可以取其中的~到两个单元,实施P、PI、PD控制。

PID控制器具有参数调整方便、控制结构简单、可靠性高等优点,同时对被控对象的数学模型要求不高,系统的控制器结构和参数可以依靠经验和现场调试来确定,此时PID控制就有很大的灵活性。PID控制也有其固有的缺点。PID在控制非线性、时变、耦合及参数和结构不确定的复杂过程时,效果不是太好;

最主要的是，如果 PID 控制不能控制复杂过程，无论怎么调节参数都没用^[4-5]。

3.2 PID 控制原理

在模拟控制系统中，常规 PID 控制系统原理框图如图 3.1 所示，系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。

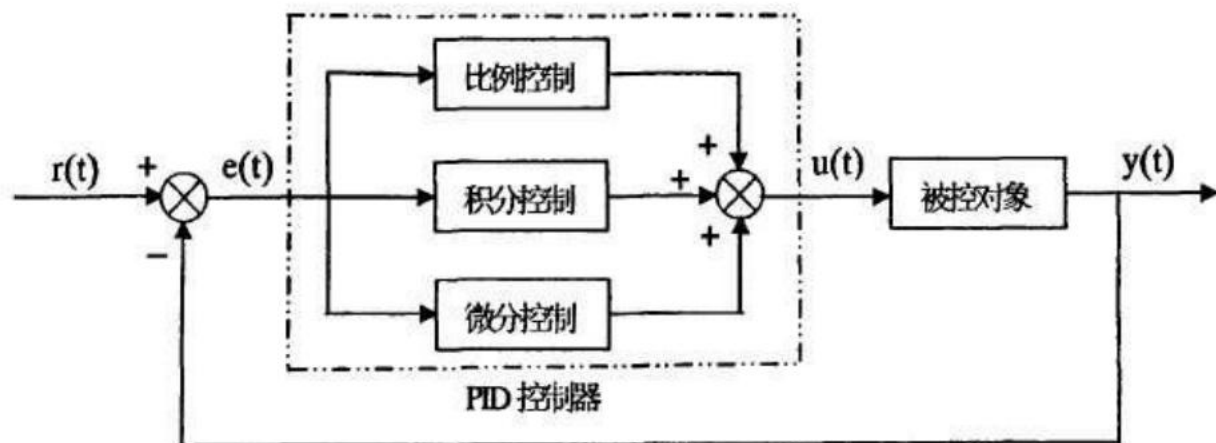


图 3.1 常规 PID 控制系统原理图

PID 是一种线性控制器，它根据输入 $r(t)$ 和输出 $y(t)$ 构成控制偏差：

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.2)$$

将偏差的比例(P)、积分(I)和微分(D)通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制。其控制规律为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.3)$$

或写成传递函数的形式：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.4)$$

式中， K_p —比例系数；

T_i —积分时间常数；

T_d —微分时间常数。

简单说来，PID 控制器各校正环节的作用：

(1)比例环节

控制器的输出与输入的误差信号成比例关系，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。比例作用大可以加快调节时间，但是过大就会影响系统的稳定性甚至使系统处于不稳定状态。

(2)积分环节

主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数越大，积分时间越弱，反之则越强。

(3)微分环节

能反映偏差信号的变化趋势(变化速率)，在偏差信号值变得太大之前，系统中引入了一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减小调节时间。

3.3 基本控制规律

确定校正装置的形式时，应先了解校正所提供的控制规律，以便选择响应的元件。包含校正在内的控制器，可采用比例、微分、积分等基本控制规律或者采用这些基本控制规律的组合，以达到对被控对象的有效控制。

(1) 比例(P)控制规律：

控制器的输出与输入误差成比例关系，实质上是一个具有增益可调的放大器。在串联校正中，增加控制器增益 K ，可提高系统的开环增益，减小系统的稳态误差，加快系统的响应速度，但增大比例系数会使最大超调量增大，同时降低系统的稳定性，甚至造成系统的不稳定。此外，纯比例控制器属有差调节，单独作用不能消除稳态误差，所以一般不单独使用。

(2) 比例-微分(PD)控制规律：

传递函数为：

$$G(s) = K_p(1 + \tau s) \quad (3.5)$$

式中， K_p -比例系数；

τ -微分时间常数。

PD 控制器中的微分控制规律，能反映输入信号的变化趋势，产生有效的早期修正信号，以增加系统的阻尼程度，从而改善系统的稳定性。在串联校正时，

可使系统增加一个开环零点。使系统的相角裕度提高，因而有助于系统动态性能的改善。

(3) 比例-积分(PI)控制规律：

传递函数为：

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.6)$$

式中： T_i —积分时间常数。

在串联校正中，PI 控制器相当于在系统中增加了一个位于原点的开环极点，同时增加了一个位于 s 左半平面的开环零点。位于原点的极点可以提高系统的型别，以减少系统的稳态误差，从而改善系统的稳态性能；而增加的负实零点则用来减少系统的阻尼，缓和 PI 控制器极点对系统稳定性及动态过程产生的不利影响。

(4) 比例—积分—微分(PID)控制规律：

传递函数为：

$$G(s) = K_p \left(1 + \tau s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.7)$$

与 PI 控制器相比，PID 控制器同样具有提高系统的稳态性能的优点，还能提供一个实零点，在提高系统动态性能方面，具有更大的优越性。所以，在工业过程控制系统，应用最广泛的是 PID 控制器。PID 控制器各部分参数的选择，在系统现场调试中最终确定。

3.4 PID 控制器参数整定

PID 控制器的参数整定对于整个系统的设计来说是以非常重要的环节，对于不同的工程系统过程，能实现控制目标所要求的 PID 参数是不一样的。所以 PID 控制器的参数应该依据不同控制系统的特性来进行整定。PID 参数整定方法有很多种，概括起来有两大类。一是理论计算整定法。它主要是依据系统的数学模型，经过理论计算确定控制器参数。这种方法所得到的计算数据并不一定可以直接用，还必须通过工程实际进行调整和修改。二是工程整定方法，它主要依赖工程经验，直接在控制系统的实验中进行，且方法简单、易于掌握，在工程实际中被广泛采

用。PID 控制器参数整定有很多种方法，工程上常用的有：zje 西 er_Nichols 整定法、临界比例度法、衰减曲线法 I)8J。在 PID 参数进行整定时，如果能有理论的方法来确定 PID 参数当然是最理想，但在实际应用中，更多的是通过试凑法来确定 PID 的参数。本文通过理论方法未找到理想的 PID 整定参数，于是选用试凑法对 PID 控制器的三个参数进行整定，具体步骤如下：

(1)先整定比例环节。将控制器中的积分系数 K_i 和微分系数 K_d 置零，使之成为纯比例环节，将系统投入运行，再由大到小调节比例度 δ ，观察系统的响应，直到出现约 4: 1(即两峰值超调量比值，以下简称为峰值超调比)的衰减过渡曲线。

(2)然后加入积分环节。整定时，先将调整好的比例系数 E 降低 20%左右，以补偿因加入积分而引起的系统稳定性的降低，然后由小到大调节积分系数 K_i ，使系统在保持良好动态性能的情况下，消除静差。

(3)最后加入微分环节。此时可适当增加比例系数 K_p ，以补偿因加入微分而引起的系统稳定性的提高。在整定时，可以先置微分系数 K_d 为零，然后在第二步整定的基础上增大 K_p ，逐步试凑，以获得满意的调节效果。在 MATLAB 的 SIMLINK 模块中建立的仿真模型如图 3. 2。

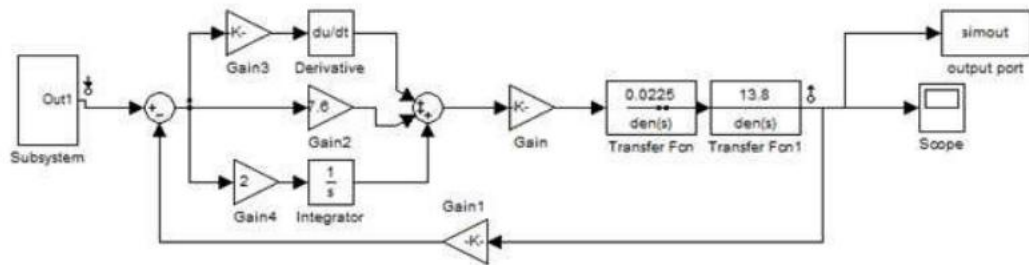


图 3.2 PID 控制仿真框图

K_i 和 k_d 置零，对比例系数整定。当 $K_P=13$ 时，得到峰值超调比为 2.32；当 $K_P=12$ $K_P=11$ 时，得到峰值超调比为 4. 4；

$K_P=10$ 时，得到峰值超调比为 6. 2；当 $K_P=11.18$ 时，得到峰值超调比为 4. 2。

仿真算法设置为变步长的龙格-库塔 45 法。变步长连续算法适用于仿真过程中系统状态变化的模型，当系统的连续状态快速变化时，这些算法可以减小仿真步长以提高仿真精度，而当系统的状态变化缓慢时，这些算法又可以增大步长以节省仿真时间。变步长的龙格-库塔 45 法具有 5 阶的计算精度、4 阶的误差估计，既满足了精度的要求，又满足了计算速度的要求，是连续系统仿真时常用

的一种数值积分方法。

通过大量的反复调整，最后得到一组理想的 PID 参数如下：

$$K_p = 7.6, K_i = 2, K_d = 0.002 \quad (3.8)$$

$tr=0.00429 < 0.01$ ，调节时间 $ts=0.0163 < 0.1$ ，超调量 $\sigma_P 3.72\% < 5\%$ 。从系统的 $K_s=7.28\text{dB}$ ，相位稳态裕量 $r=65.30$ 。从以上数据可以看出，经 PID 校正后的系统特性完全达到设计要求。

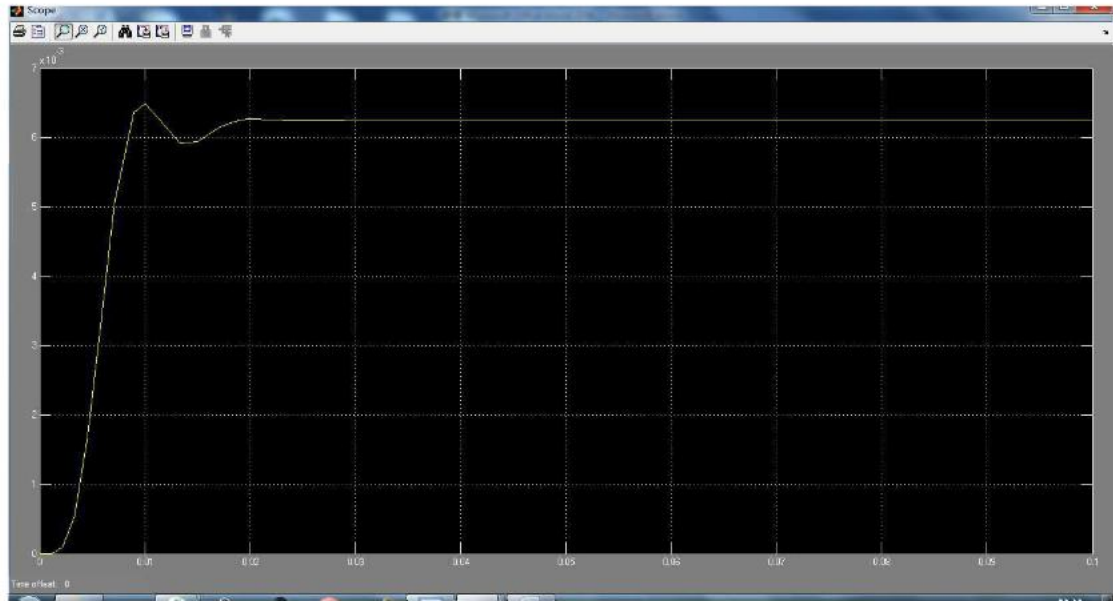


图 3.3 PID 校正后的系统阶跃响应

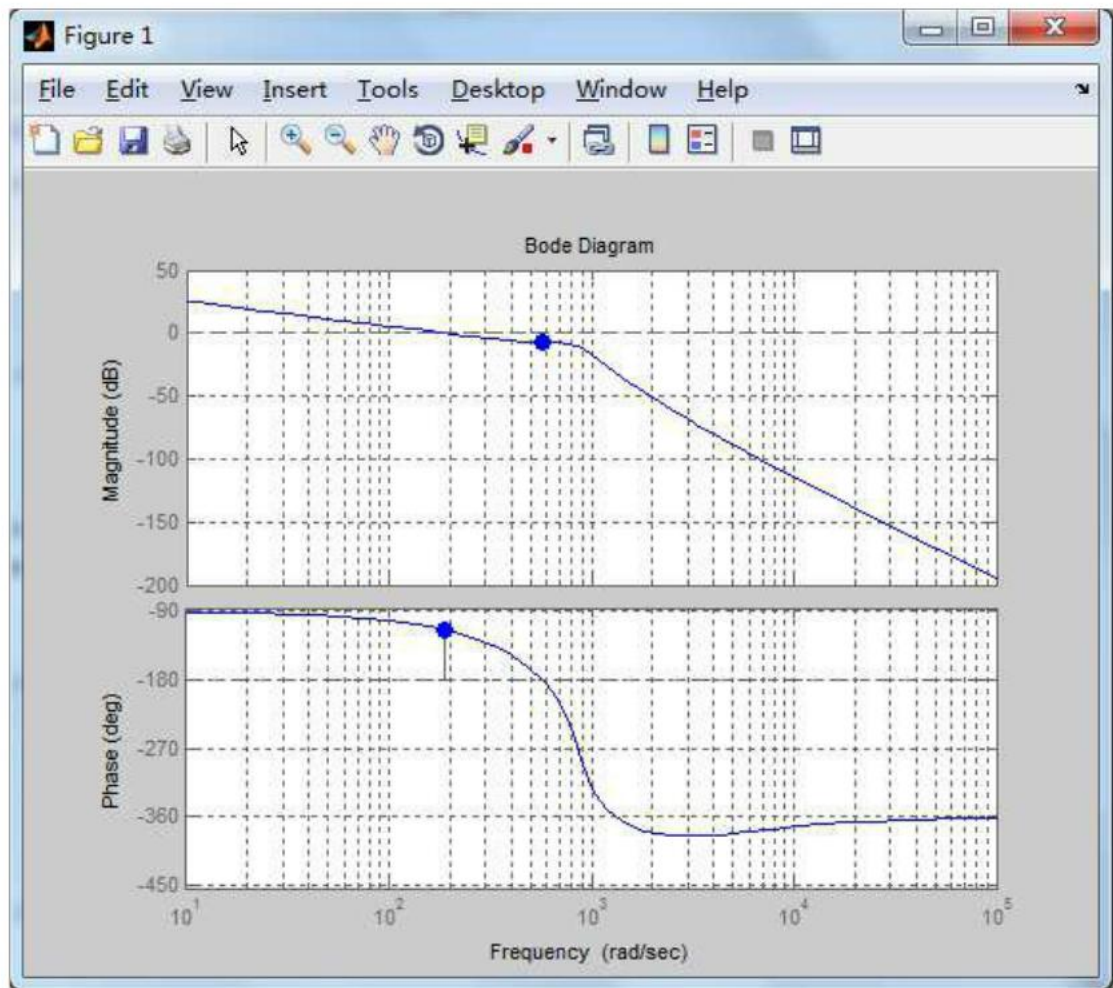


图 3.5 PID 校正后系统的 bode 图

结论

开炼机是生产子午线轮胎的重要设备，其调距性能的好坏直接影响到产品的质量。液压调距具有调距精度高、安全保护性能好、生产连续性好等优点，是传统的机械调距无法比拟的。本课题设计了电液伺服驱动的调距系统，并对其控制策略做了重点研究。通过仿真研究系统的动态特性，建立了电液伺服位置控制系统的数学模型。本文设计了常规 PID 控制器，并进行了仿真；基本满足设计要求。

参考文献

- [1] 王占林. 近代电气液压伺服控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005, 1. 11。
- [2] 宋志安. 基于 MATLAB 的液压伺服控制系统分析与设计. 北京: 国防工业

出版社，2007，5—7。

[3] 于江华，苏东海．电液伺服系统的理论与实践．机械，2007，34：17．18。

[4] Antonio Visioli. A new design for a PID plus feedforward controller. *Journal of ProcessControl*, 2004, (14): 457-458.

[5] 许贤良．控制工程基础．北京：国防工业出版社，2008，231．232。