****

专题讨论报告

|  |  |
| --- | --- |
| 课程名称 | 自动控制原理 |
| 专题题目 | 海底隧道钻机控制系统时域性能综合分析 |
| 学生姓名 | 周万川（PPT报告）  陈汉（文献背景）  周万川、阙章志  （系统设计与仿真）  赵志远 李亚君（总结） |
| 指导教师 | 谭冠政，徐德刚 |
| 学 院 | 自动化学院 |
| 专业班级 | 自动化1901班 |

自动化学院

2021年5月

**目 录**

[一 自动控制理论和方法国内研究与应用概述 5](#_Toc73532410)

[1.1 自动控制理论和方法国内外研究 5](#_Toc73532411)

[1.1.1 英吉利海峡海底隧道钻机系统背景分析 5](#_Toc73532412)

[1.1.2 自适应控制方法 7](#_Toc73532413)

[1.1.3 模糊控制理论 7](#_Toc73532414)

[1.2 自动控制理论和方法应用概述 7](#_Toc73532415)

[1.2.1 自适应控制应用于潜油电机采油系统 7](#_Toc73532416)

[1.2.2 模糊控制改进卷烟制丝工序中热风系统 8](#_Toc73532417)

[二 专题任务描述 8](#_Toc73532418)

[三 控制器模型建立与仿真算法 9](#_Toc73532419)

[3.1 测速反馈建模与仿真 10](#_Toc73532420)

[3.1.1 测速反馈模型与理论分析 10](#_Toc73532421)

[3.1.2 测速反馈控制的参数整定 10](#_Toc73532422)

[3.2 PD、PID建模建模与仿真 14](#_Toc73532423)

[3.2.1 PD法模型与理论分析 14](#_Toc73532424)

[3.2.2 PID法模型与试凑法整定 15](#_Toc73532425)

[3.2.3 仿真与比较 16](#_Toc73532426)

[3.3 模糊自适应PID控制建模与仿真 19](#_Toc73532427)

[3.3.1 定义模糊接口 19](#_Toc73532428)

[3.3.2 知识库设计 20](#_Toc73532429)

[3.3.3 推理机与解模糊接口 20](#_Toc73532430)

[3.3.4 仿真 21](#_Toc73532431)

[3.4 模型综合评估 23](#_Toc73532432)

[四 改进思路 26](#_Toc73532433)

[五 总结与展望 26](#_Toc73532434)

摘要

英吉利海峡隧道，又称英法海底隧道、欧洲隧道，1994年5月6日开通。是一条英国通往法国的铁路隧道，位于英国多弗港与法国加来港之间。在这条隧道工程实践中，是由两头同时开始开钻。为使得两部分隧道精准相接，实际采用了激光引导系统。

本文致力于分析讨论各种控制方法对于系统稳态误差和动态性能的影响，并将这些控制方法对比讨论，选择出较为适合的控制方法。本文主要研究了PD控制、传统的PID控制、测速反馈控制和模糊控制，并分析了其参数的选择，使用试探法编程遍历求解来选择合适的参数，使得每种控制方法都做到最优化，然后在一起比较其稳态误差大小和相应的动态性能指标是否满足要求。本文新颖的选择使用模糊控制来对本题进行分析，将现代先进的控制方法应用到实际问题上，体现了本文的控制方法选择的完整性。

**关键词** 钻机控制系统、稳态误差、动态响应、PID控制、模糊控制

**Abstract**

The channel tunnel, also known as the British French submarine tunnel and the European tunnel, was opened on May 6, 1994. It is a British railway tunnel to France, between Dover and Calais. In this tunnel engineering practice, it is from two ends to start drilling at the same time. In order to make the two parts of the tunnel connect accurately, the laser guidance system is used in practice.

This paper is devoted to the analysis and discussion of the influence of various control methods on the steady-state error and dynamic performance of the system. The control methods are compared and discussed, and the suitable control methods are selected. This paper mainly studies PD control, traditional PID control, speed measurement feedback control and fuzzy control, and analyzes the selection of its parameters. It uses the exploratory programming to traverse the solution to select the appropriate parameters, making each control method achieve optimization, and then compares the stability error and the corresponding dynamic performance indicators to meet the requirements. This paper uses fuzzy control to analyze the problem, and applies the modern advanced control method to the practical problems, which reflects the integrity of the choice of the control method.

**Keyword** Drilling-rig-control System-steady-state-error Dynamic-response PID control Fuzzy control

# 自动控制理论和方法国内研究与应用概述

## 自动控制理论和方法国内外研究

### 英吉利海峡海底隧道钻机系统背景分析

英吉利海峡隧道，又称英法海底隧道、欧洲隧道，1994年5月6日开通。是一条英国通往法国的铁路隧道，位于英国多弗港与法国加来港之间。英吉利海峡隧道由三条长51km的平行隧洞组成，总长度153km，其中海底段的隧洞长度为3×38km，是世界第二长的海底隧道及海底段世界最长的铁路隧道。两条铁路洞衬砌后的直径为7.6m,开挖洞径为8.36~8.78m；中间一条后勤服务洞衬砌后的直径为4.8m，开挖洞径为5.38~5.77m。从1986年2月12日法、英两国签订关于隧道连接的坎特布利条约（Treaty of Kanterbury）到1994年5月7日正式通车，历时8年多，耗资约100亿英镑（约150亿美元），也是世界上规模最大的利用私人资本建造的工程项目。隧道横跨英吉利海峡，使由欧洲往返英国的时间大大缩短。隧道长度50公里，仅次于日本青函隧道。海底长度39公里。单程需35分钟。通过隧道的火车有长途火车、专载公路货车的区间火车、载运其他公路车辆（像是大客车、一般汽车、摩托车、自行车）的区间火车。隧道由欧洲隧道技术公司经营，但因为隧道建造费用极高，所以债务沉重。

1986年2月12日英国首相撒切尔夫人和法国总统密特朗在英国东南部的坎特伯雷大教堂参加了英法两国海峡隧道条约的签字仪式，从而正式确认了两国政府对于建造海峡隧道工程的承诺。因法国宪法规定总统不能签署对外条约，当天在条约上签字的是英国外交大臣杰弗里·豪和法国对外关系部长罗朗·迪马。在签字仪式上，撒切尔夫人说，这项条约为英法两国的工业合作写下了新的篇章，并且对整个欧洲来说也是一个重要的事件。密特朗总统指出，这项条约是两国人民关系史上的一个重要里程碑。英国同欧洲大陆的联系自古以来主要是通过英吉利海峡进行摆渡。海峡间的运输极为频繁。以1984年为例，往返运输客运为两千万人次，货运达两千万吨。这样繁忙的往来，使人越来越感到解决海峡运输问题是势在必行了。早在1751年，法国学者尼克拉·德马雷曾写过一篇《古代英法接壤论》，阐明上古时代英法两国的国土是连接在一起的。1802年法国工程师马悌厄曾向拿破仑一世建议修筑一条海底隧道直通英国，但被否决了。以后，许多人又接连提出过各种开凿英法海峡隧道的建议。现代欧洲经济的发展再次把这一隧道工程迫切地提到人们面前。

1973年11月，英法两国政府签订了关于修建海底隧道的条约，并提出了具体方案。1978年，两国国营铁路公司恢复了对开凿隧道计划的研究。1984年11月，英国首相撒切尔夫人与法国总统密特朗达成基本协议。1985年5月，两国政府又邀请各国主要工程公司和银行财团提出工程计划草案。法英领导人选定的方案是英法海峡隧道财团提出的。按照该方案的初步设计，在海峡最窄处的多弗尔—加来之间，于海底40米深处的白垩岩中，开凿两条长50余公里、直径7.3米的铁路隧道，其中37公里在海底。一条供巴黎—伦敦的火车通行，另一条供穿梭列车营运，专门载运乘汽车穿越海峡的人员及其车辆。在这两条主隧道的中轴线当中，再开一条直径4.5米的服务隧道，每隔375米与主隧道贯通，解决通风和维修等问题。该工程总耗资预计约530亿法郎。两国政府均不提供公共资金，全部利用私人资本建设。两国政府同时责成英法海峡财团在15年内提出另修一条固定公路通道的方案。英法海峡财团是由两国15家公司和银行组成的。

1994年5月6日，是英国与法国乃至欧洲大陆关系史上一个十分重要的日子。1.1万名工程技术人员用近七年之久的辛勤劳动，终于把自拿破仑.波拿巴以来将近二百年的梦想变成了现实。滔滔沧海变通途，一条海底隧道把孤悬在大西洋中的英伦三岛与欧洲大陆紧密地连接起来，为欧洲交通史写下了重要的一笔。欧洲隧道是指横贯英法之间多佛海峡的海底铁路隧道，又称海峡隧道。它西起英国的福克斯通，东到法国的加来，全长50公里，水下长度38公里，为世界最长的海底隧道。这项工程由三条隧道和两个终点站组成。三条隧道由北向南平行排列，南北两隧道相距30米，是单线单向的铁路隧道，隧道直径为7.6米；中间隧道为辅助隧道，用于上述两隧道的维修和救援工作，直径为4.8米。在辅助隧道的1/3和2/3处，分别为两运营隧道修建了横向联接隧道。当铁路出现故障时，可把在一侧隧道内运行的列车转入另一隧道继续运行，而不中断整个隧道的运营业务。在辅助隧道线上，每隔375米，都有通道与两主隧道相连，以便维修人员工作和在紧急情况下疏散人员。地质钻探工作从1958年做到1987年，重要的钻孔达94个。浅层勘探在海底以下150m之内，考虑隧道布置的范围；深层勘探在海底以下800m之内，主要为评价地震风险提供数据。海底钻探曾采用英国的大型海上石油钻机，每个钻孔平均费用约为50万英镑。勘探发现海底有一层泥灰质白垩岩（Chalk Marl)，厚度约30m，饱和容重约23KN/m3，抗压强度6~9MPa，变形模量800~1600MPa，蠕变系数φ=1.5，渗透系数（1~2)×10-7m/s。该岩层抗渗性好，硬度不大，裂隙也较少，易于掘进，隧道线路就布置在它的下部，距海底25~40m。由于岩层的起伏，而隧道要求一定的运行坡度，所以隧道轴线在平面和立面上均呈平坦的W形。工程专家们认为，充分的地质资料和正确的判断，使欧洲隧道找到了理想的岩层。隧道启用后，把伦敦至巴黎的陆上旅行时间缩短了一半，3小时即可到达。从伦敦飞到巴黎，航程一般需要3小时左右。而事先还要订票，经隧道乘火车，时间一样，却省去不少麻烦。

据英国铁路当局估算，每年通过隧道的旅客人数可达1800万人，货运可达800万吨。欧洲隧道于1987年12月1日正式开工，造价150亿美元，原计划1993年通车，后延迟一年。修建资金主要来源于国际银行贷款和出售股票，由英法财团承建。欧洲隧道使用的客货列车，均由2台机车牵引，每台机车功率为7600马力，平均最高时速为140公里。在1994年5月6日欧洲隧道的通车典礼上，当时的法国总统密特朗和英国女王伊丽莎白二世在隧道两端——法国的加来和英国的福克斯通共同主持了盛大的通车剪彩仪式。两国元首在剪彩典礼上发表了讲话。密特朗说，两个多世纪的理想实现了，他本人和法国人民都为这一工程的实现而感到高兴。这一工程将促进欧洲统一建设，英法两国之间所做的事不会使欧洲其他地方感到无动于衷。伊丽莎白二世女王说，这是第一次英法两国元首不是乘船，也不是乘飞机来会面的。她希望海底隧道能增加两国人民间的相互吸引力，希望两国继续进行共同的事业。隧道的开通填补了欧洲铁路网中短缺的一环，大大方便了欧洲各大城市之间的来往。英、法、比利时三国铁路部门联营的“欧洲之星”（Eurostar)列车车速达300km/h；平均旅行时间，在伦敦与巴黎之间为3个小时，在伦敦和布鲁塞尔之间为3小时10分。如果把从市区到机场的时间算在内，乘飞机还不如乘‘欧洲之星’快。欧洲隧道还专门设计了一种运送公路车辆的区间列车，称“乐谢拖”（Le Shuttle）。各种大小汽车都可以全天候地通过英吉利海峡，从而使欧洲公路网也连成了一体。人们称誉这项工程为“一梦200年海峡变通途”。

### 自适应控制方法

在设计之初确定好基本控制系统初始参数后，系统在外界外界环境变化下，系统需要根据情况自动调整系统参数，来达到使系统依旧处于最优控制下的目的。比如应用范围最广的PID控制有三个参数，利用自适应控制方法使得系统在条件改变下，自动调解新的三个参数，使得系统依旧处于最优控制下。

自适应控制系统定义来说是指具有自行组织的特性，包括三个基本动作:识别对象的动态特性，在识别对象的基础上采取决策;根据决策指令改变系统动作。把凡是能自动调整控制系统中控制器参数或控制规律的系统均称为自适应控制系统。自适应控制方法是指:依据确定性等价原理和分离设计原则，设计时变系统的控制器分为两步。第一步，将被控对象的参数设为已知参数，按照要求的性能指标设计控制器。第二步，使用参数辨识对被控对象进行估值，最后使用估值参数对系统进行控制。【1】[1]

### 模糊控制理论

在处理系统时传统理论方法太过依赖于系统的动态模式，导致处理复杂系统时变量太多，难以正确描绘系统的动态，于是模糊控制应运而生。模糊控制器主要包括四部分：①：模糊化。主要作用是选定模糊[控制器](https://baike.baidu.com/item/%E6%8E%A7%E5%88%B6%E5%99%A8)的输入量，并将其转换为系统可识别的模糊量，具体包含以下三步：第一，对输入量进行满足模糊控制需求的处理；第二，对输入量进行尺度变换；第三，确定各输入量的模糊语言取值和相应的隶属度函数。②：规则库。根据人类专家的经验建立模糊规则库。模糊规则库包含众多控制规则，是从实际控制经验过渡到模糊控制器的关键步骤。③：模糊推理。主要实现基于知识的推理决策。④：解模糊。主要作用是将推理得到的控制量转化为控制输出。

## 自动控制理论和方法应用概述

### 自适应控制应用于潜油电机采油系统

为满足当前采油工程的生产需要，潜油电泵机组已被大量地应用于油井的二次和三次开采中。通过使用变频技术，可以使电泵机组中的潜油电机得到较好的工作性能并能提高整个机组生产效率【1】[6]。在现有的机组中，大多采用变压变频恒磁通开环控制调速技术。但是随着生产要求的提高，对原有的调速系统提出了新的要求。

潜油电泵中的潜油电机为鼠笼式感应电机，一般工作在1000~3000m深，井下环境具有温度高、压力大等特点【1】[7]。温度的变化会影响到潜油电机定、转子电阻，引起的电阻变化可使电机动静态性能变坏。与此同时，要实现多井稳定生产的综合【1】[8]管理以及油井的高效运行，就需要对潜油电机的转速进行控制。为了解决以上问题，需要对已有的系统进行优化改造，提高其自动化程度和稳定性。同时，尽量避免大批量的更换已有设备，减少资源浪费。

为了减小电机参数变化对系统控制效果的影响，科研人员提出了一系列的解决方案。提出了利用自适应逆控制算法解决感应电机参数时变问题，提高系统的动静态性能。通过应用基于自适应观测器的鲁棒控制策略，实现对转子磁场的控制，进而提高了系统性能。

### 模糊控制改进卷烟制丝工序中热风系统

在卷烟制丝工序中需要使用热风系统为滚筒类设备提供工艺热风。热风系统主要由空气加热器中间过渡件、风机、热空气通道、温度控制仪器和测量仪表组成【1】[10]，系统风量可通过改变风机频率进行调节【1】[11]，热风温度可根据工艺要求自动调节，其对于卷烟香气、烟气和口感特性都会产生影响【1】[12]。由于温度是一个大惯性的控制变量，温度控制本身是一阶纯滞后环节，因此 热风系统具有大时滞、非线性等特点，且难以建立精确的数学模型。

常规PID常规PID控制器是应用最基本、最广泛的一种控制器,它具有算法简单,稳定性、可靠性好等优点【1】[15]，但传统的 PID 控制算法是在某一特定条件下整定完成的,因此当工况发生变化时,一组PID参数很难适应不同的工作条件,因此往往不能达到理想的设计性能【1】[20]，从而影响控制效果的提高。幅相裕度法是利用幅值裕度和相角裕度整定PID参数,这能使系统具有良好的控制性能和鲁棒性能。Ho等在这方面作了许多工作【1】[24]。近年来，模糊逻辑控制（Fuzzy Logic Control）广泛应用于生产制造过程中。该技术是一种非线性控制，以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础，根据现场操作人员的控制经验和相关专家的知识，在设计中不需要建立被控对象的精确数学模型【1】[13]，当热风温度设定值发生变化时，控制系统可以智能模拟人工控制过程和方法。

为此，采用西门子公司的SIMATICS7-400系列PLC，利用模糊控制算法对卷烟制丝工序中的热风温度控制系统进行了改进【1】[14]，以提高热风控制系统的稳态精度和动态性能，满足不同规格卷烟品牌对工艺热风温度的要求。

# 专题任务描述

英吉利海峡隧道，又称英法海底隧道、欧洲隧道，1994年5月6日开通。是一条英国通往法国的铁路隧道，位于英国多弗港与法国加来港之间。在这条隧道工程实践中，是由两头同时开始开钻。为使得两部分隧道精准相接，实际采用了激光引导系统。

本次专题任务在于选择合适的控制方法如PD、PID、测速反馈、模糊控制。通过调整对应控制方法的参数，得到最优的控制方法。实现对于稳态误差及扰动信号引起的误差的减小及消除，同时兼顾系统动态性能。使得系统满足工程要求。

# 控制器模型建立与仿真算法

本题的场景为海底隧道钻机系统，其中，输入为钻机的转动角度信息，记为，控制量为钻机的实际转动角度，记为，钻机转动时，有由于外部的泥土海水压力等阻碍而产生的扰动量，将之记为，该扰动量对输入角度的转动有抑制作用，此外钻机本身系统固有的结构使用传递函数描述，得出系统框图如下图所示：

|  |
| --- |
|  |

Figure 1系统一般框图

要使得系统达到预期的效果，我们只能改变控制器的结构，我们将分别对采用测速反馈、PD、PID、模糊自适应控制时的系统建模，并进行仿真，最后评估出一组最优的控制方案。

为简化问题起见，我们引入如下几个假设，并将在评估时考虑实际情况加以考虑：

* 系统的输入为某个角度值，即一个跳变，这里简化为。
* 系统的扰动为某个在系统开始响应后就一直存在的阻力，这里也简化为
* 假设系统需要达到的动态指标中，重要性从高到低为：稳态误差、超调量、调节时间、峰值时间、响应时间。命名方式按教材，不再赘述。

这里，我们可以按照我们的假设做出一点推论：

若输入为阶跃，则理想输出为阶跃，理想输出为阶跃信号时，将其去理想化，及加入若干较远的零极点，或对消的零极点，以研究其性质，我们得到干扰作用后的输出可能为：

以及去理想输出可能为：

其中均代表很小的一个正数，为任意整数，且需要各式中分母阶次比分子介词大两次，这样，我们才能同时满足：

这样，我们既无稳态误差，又在t=0处不是跳变的，因此将有实现可能。

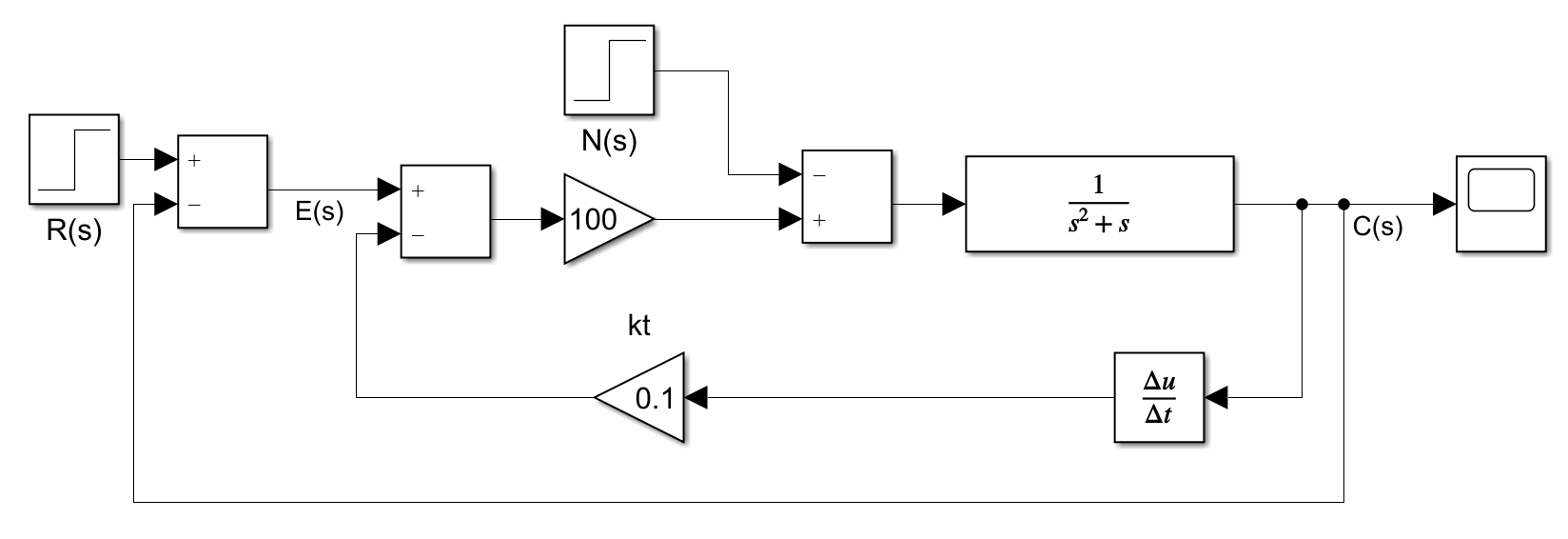
## 测速反馈建模与仿真

### 测速反馈模型与理论分析

测速反馈控制是利用输出量的导数来改善系统性能的一种控制方式。它通过将输出的速度信号反馈到系统输入端，并与误差信号比较，可以增大系统阻尼，改善系统动态性能。但同时，测速反馈会增大系统的稳态误差。然而隧道的施工过程需要高精度的激光导引，这对于控制稳态误差提出了较高的要求。所以，需要通过提高原系统的开环增益，以弥补稳态误差的损失。

为此，我们将原系统的开环增益提高了10倍，经过计算，稳态误差可以满足工程要求。

采用测速反馈校正时，系统的结构图如下：



①当R(s)=0时,在阶跃扰动作用下，系统的稳态输出为：

②当N(s)=0时，在单位阶跃信号作用下，系统的稳态输出为：

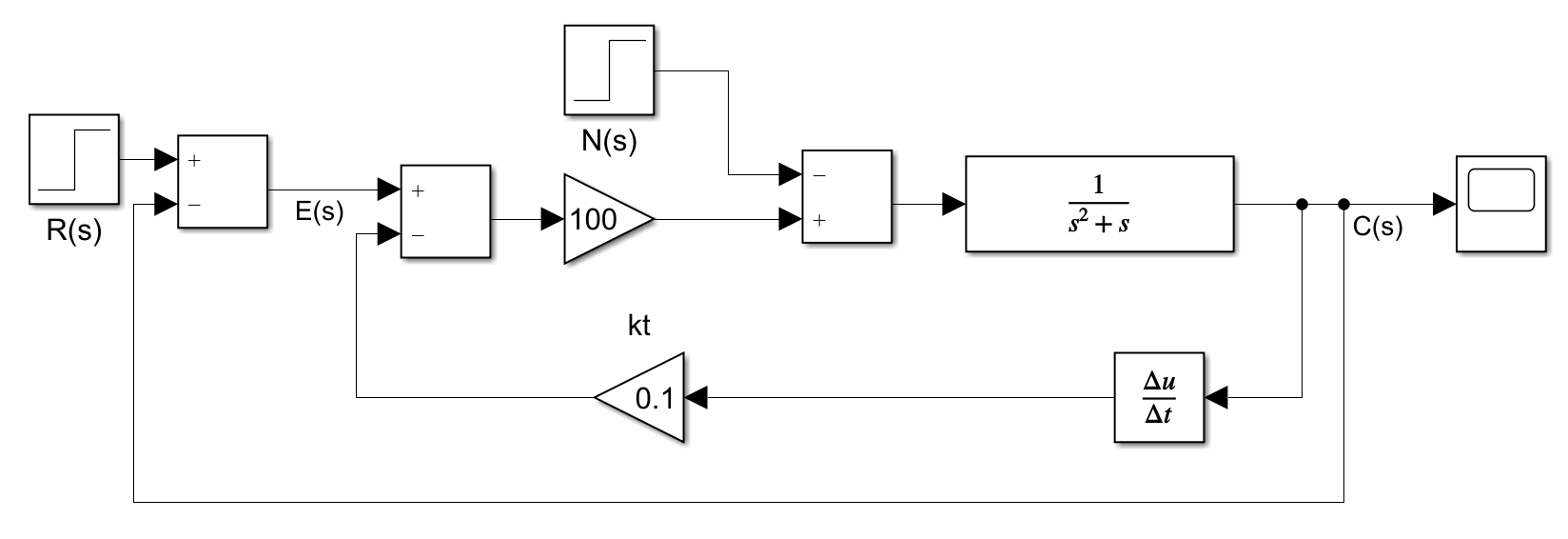
③在R(s)和N(s)共同作用下，系统的稳态输出传递函数为：

系统的稳态误差为：

综上，可见将原系统的开环增益提高10倍后，系统的稳态误差已经能够满足工程施工要求。下面，需要通过选取合适的kt值来提高系统的动态性能。

### 测速反馈控制的参数整定

仿真结构图如下



适当选取kt值，进行系统仿真。从kt=0.05开始：

当k=0.05时，单位阶跃响应与单位阶跃扰动响应仿真结果如下：

|  |
| --- |
|  |

当k=0.1时，单位阶跃响应与单位阶跃扰动响应仿真结果如下：

|  |
| --- |
|  |

当k=0.15时，单位阶跃响应与单位阶跃扰动响应仿真结果如下：

|  |
| --- |
|  |

当k=0.2时，单位阶跃响应与单位阶跃扰动响应仿真结果如下：

|  |
| --- |
|  |

当k=0.25时，单位阶跃响应与单位阶跃扰动响应仿真结果如下：

|  |
| --- |
|  |

为了寻找出能使动态性能最优且稳态误差符合要求的kt值，编写了如下代码。通过遍历给定范围内的kt值，分别求得各动态性能参数以及稳态误差，绘制出散点图。

|  |
| --- |
| %测速反馈 单位阶跃响应&扰动综合比较图  clc;clear all;  kt\_vet =0:0.005:0.3; % 阻尼比序列  G0=tf(1,[1 1 0]);    for ii=1:length(kt\_vet)  GC1=tf([kt\_vet(ii) 0],1);  GC2=tf([100\*kt\_vet(ii),100],1);  F1=feedback(feedback(series(G0,tf(100,1)),GC1,-1),1,-1);  F2=-feedback(G0,GC2,-1);  %单位阶跃响应  [y1,t1]=step(F1);  if mod(ii,10)==0  plot(t1,y1);  end  hold on;  [ys1(ii),tr1(ii),ts1(ii),tm1(ii),ov1(ii)]=Fun\_Step\_Performance(t1,y1,0);  %阶跃扰动  [y2,t2]=step(F2);  end  figure  subplot(221)  plot( kt\_vet,tr1,'r.' )  xlabel('K值')  ylabel('上升时间/s')  subplot(222)  plot( kt\_vet,ts1,'r.' )  xlabel('K值')  ylabel('调整时间/s')  subplot(223)  plot( kt\_vet,tm1,'r.' )  xlabel('K值')  ylabel('峰值时间/s')  subplot(224)  plot( kt\_vet,ov1,'r.' )  xlabel('K值')  ylabel('超调量/%') |

其中Fun\_Step\_Performance函数可以通过给定阶跃响应曲线，求得上升时间，调整时间，峰值时间，超调量等动态性能参数。

为了防止曲线重叠在一起，选取了几个典型kt值，绘制出单位阶跃响应曲线图和单位阶跃扰动响应图如下：

|  |
| --- |
|  |

从上图中数据可得，单位阶跃扰动的稳态误差均为-0.01，满足系统的稳态性能要求。

当kt从0-0.3间隔0.005取值时，系统的动态性能指标随kt变换曲线如下：

|  |
| --- |
|  |

由上图分析可得，随着k值的增大单位阶跃输入下超调量不断减小，当kt=0.16时，系统已没有超调量。调节时间在0.145到0.15突降，而后从0.15开始随着kt的增大而增大。综合考虑调整时间和超调量，选取Kt=0.16可以较好得兼顾反应速度和较小的超调量。此时调节时间为0.428s，没有超调。

Kt=0.16时，单位阶跃响应：

|  |
| --- |
|  |

## PD、PID建模建模与仿真

### PD法模型与理论分析

使用PD法时，系统的模型框图如下：

|  |
| --- |
|  |

Figure 2 PD框图

对系统的各个环节取拉式变换，我们设：

PD控制器环节的传递函数为：

钻机环节的传递函数为：

由于该函数可以拆分为积分环节和惯性环节的组合，所以钻机系统对扰动信号有积分作用，积分的结果经反馈进入PD控制器中重新得到扰动信号的相反信号，恰好将消除扰动信号的作用，但是由于积分在前，所以会导致有恒值的稳态误差存在。

系统稳态误差分为扰动引起的误差以及输入引起的误差两部分，从输出端来看，其稳态值应等于输入稳态值，因为：

所以系统输入的传递函数的特征方程为：

可得系统稳定的条件为：

实际上，将上式中从分母提出一个比例系数，那么将可以写出尾一标准形式的传递函数，如果真的写出，我们将可以得出，实际上通过参数的选择，使得极点离原点尽量远即可从理论上满足设计要求。

从而求得扰动引起的输出的稳态值为：

该值应该尽可能趋近于0，所以KP值应该尽量大。

输入引起的稳态输出为：

可知，仅由输入作用时无稳态误差。

由加一个闭环零点的二阶系统的性质可知：

峰值时间：

超调量：

调节时间：

由此可见，PD控制可以增大系统阻尼，减小超调，调节时间，且不影响常值稳态误差以及系统的的自然频率，本题海底并没有高频噪声，所以PD控制的缺点不会有很大体现。

### PID法模型与试凑法整定

PID控制器模型由比例积分微分三个环节并联而成，其中微分环节实际物理不可实现，但我们还是给出理想的PID控制器模型：

我们试图用试凑法求出系统的最优PID参数，其主要思想是一开始只考虑K值的影响，选择能使系统超调、调节时间较快的*K*值，然后再加入积分环节，使得系统在动态性能没有太大改变的基础上，稳态误差被消除，最后引入微分环节，减小超调量和调节时间。设计完成后微调各个参数使得系统性能最佳。

但在这之前，我们要先进行稳态分析，我们求得：

|  |
| --- |
|  |

代入输入和扰动均为阶跃的条件，我们可以得到：

则说明PID控制器可以做到稳态无误差。

此时系统的特征多项式：

使用routh判据：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 0 |
|  |  |  | 0 |
|  |  | 0 | 0 |
|  | KI | 0 | 0 |

可得系统稳定条件：

与的对应关系可以由表达式简单求出，不再赘述。

### 仿真与比较

(1) PD参数选择与仿真

依据1.2.1的模型建立simulink模型，改变KP,KD的值，绘图若干次，可得系统响应的优化过渡过程，以及近似最优参数下的系统响应：

|  |
| --- |
|  |

仿真过程中我们发现，因为PD控制中KD不影响稳态精度，所以近似可以认为微分系数越大输入响应性能越好，同时比例系数越大抗干扰能力越强，因此实际上这个系统无法取得最优解。于是取一个足够好的解，但这时对应得到的仿真输出并不理想，原因是实际上的系统使用加入一阶极点的方式近似代替微分器，而微分器实际上是物理不可实现的，系统的近似微分环节所配置的极点不能过于远离原点，否则仿真将很难求解，所以其增益不可能过大，所以我们重新选择参数，将N配置为100，这样可以得到仿真下的近似最优参数KP=119.60357579077119，KD=41.892756897184746，这时的仿真图如下：

|  |
| --- |
| Data Inspector中： |

计算其动态性能指标得：

**超调量：6.3%，峰值时间：0.075s，调节时间：0.1s**

此时稳态误差大约为0.01.

(2) PID参数选择与仿真

根据1.2.2建立的模型，我们建立仿真模型，并使用凑配法选择参数，首先调节K值，其实即相当于调节系统的增益，可以利用根轨迹近似估计对应的根的变化情况如下：

|  |
| --- |
|  |

此时系统

要使性能尽可能优，阻尼比的范围应为0.707左右，对应K值在0.5左右，利用程序遍历，可以得到响应的变化过程：

|  |
| --- |
|  |

由记录可得保守取值K=0.34，理想取值1.88，下面在此基础上做仿真。

仿真原理图：

|  |
| --- |
|  |

实际仿真发现不能按K在外的传递函数表达式取值，所以重新选取K值，利用上述试凑法得出近似最优参数为：

KP=26.08241;

KD=18.3923;

KI=35.53313;

此时的优化过渡过程以及最优阶跃响应曲线如下：

|  |
| --- |
|  |

由自己编写的求动态指标函数求得其动态指标：

Mp=0.044730

tr=0.740000

ts=1.720000

从这个角度看，PID控制似乎不如PD控制，然而实际上，我们对PD控制的调参使用了遗传算法来搜索，而PID仅仅是手动调参后进行的仿真，鉴于PID可以与模糊控制、遗传算法等等结合使用，且PD控制确实存在超调过大、实际稳态误差无法消除的问题，所以我们尝试分别使用模糊控制PID进行优化。

## 模糊自适应PID控制建模与仿真

这里我们主要考虑使用模糊控制方法实现PID参数的自适应整定，首先给出模糊控制器如下：

|  |
| --- |
|  |

其中模糊控制器的输入即为系统设定量与输出量之间的误差，输出为控制量

### 定义模糊接口

对于一个输入变量组成的论域，我们考虑将其映射到[0,1]的区间内并定义八个等级为模糊矢量：

分别代表负大、负中、负小、负零等等，每个模糊矢量中的元素以一个隶属度函数刻画，比如NB的隶属度函数为，做出矢量的隶属度函数大略图如下：

|  |
| --- |
|  |

实际设计中我们使用matlab工具箱生成隶属度函数，matlab中生成隶属度函数可以选取不同的函数类型，这里选用一般选用的三角形函数，这样的好处是模糊子集分辨率较高，控制灵敏度也较高，但会带来稳定性不足的问题，所以实际仿真时，我们对其中部分隶属度函数进行了函数类型的调整，这样调整的原则是，在误差较大的区域采用低分辨率的模糊集，在误差较小的区域采用较高分辨率的模糊集，当误差接近于零时选用高分辨率的模糊集。

### 知识库设计

知识库分为数据库和规则库两部分。我们分别设计。

(1)数据库DB

数据库存放输入输出变量的模糊子集的隶属度矢量值，对于本题的连续输入误差，则为隶属度函数，在规则推理的模糊关系方程求解过程中，向推理机提供数据。

(2)规则库RB

规则库用于存放由神经网络生成的模糊规则，一条模糊规则由语句的形式给出，例如下面：

其中e，ec为模糊控制器的输入，u为其输出。

对于误差和误差的差分，我们分别定义其属于论域U、V，并定义A、B分别为对应论域上的模糊子集，R为控制决策表，那么类似于IF A and B then C的语句可以数学的表示为：

∘表示模糊矩阵的合成，类似于普通矩阵的乘积运算，将乘积运算换成“取小”，将加法运算换成“取大”，其实质是对与或的推广。

### 推理机与解模糊接口

上面我们完成了模糊化和知识库的概念化设计，下面我们考虑实际的PID自适应算法模型，模糊自适应PID对应的系统结构如下图：

|  |
| --- |
|  |

假设我们已经从输入的E和EC中求解出KI KP KD的隶属度，那么我们首先将KP定义为模糊集：

然后使用matlab模糊控制工具箱，选定函数类型为三角形，生成KP对应的各个模糊子集。

KI、KD的模糊化同理可得。

若采用重心法解模糊，

|  |
| --- |
| https://img-blog.csdn.net/20180117162706017?watermark/2/text/aHR0cDovL2Jsb2cuY3Nkbi5uZXQvcXFfMzQ0NDUzODg=/font/5a6L5L2T/fontsize/400/fill/I0JBQkFCMA==/dissolve/70/gravity/SouthEast |

实际就依次将u换成各个系数即可，不会影响仿真结果。

### 仿真

首先确定模糊控制器的结构为双输入，三输出结构：

|  |
| --- |
|  |

然后设置隶属度函数：

|  |
| --- |
|  |

初始论域，设置E和EC分别为[-2 2] [-2 2]，KP，KI，KD三个参数初始设置论域为[0 100]后续根据仿真结果人为修改之。

输入模糊表，模糊表如下图所示：

|  |
| --- |
|  |

多次修改论域，以及修改模糊表中的控制规则，

设计模糊控制框图模型：

|  |
| --- |
|  |

得出模糊控制的仿真结果：

|  |
| --- |
|  |

在Data Inspector中打开，可得：

|  |
| --- |
|  |

得出动态指标：

Mp=1.5%

ts=0.06

tp=0.08

因为此处超调小于调节要求，所以导致调节时间小于峰值时间。

## 模型综合评估

评估的主要问题是评判PID控制和模糊PID控制的优劣，上面我们已经得到了两者的阶跃响应，对比起来模糊PID性能更为优秀，于是在这里我们做了两种测试。

**（1）跟随能力比较**

一是对两种控制方法的跟随能力进行比较，我们在simulink中为两个控制系统接入随机的噪声信号作为输入，干扰也同样接入随机噪声，得到PID的响应如下图：

|  |
| --- |
|  |

实际上，我们使用了遗传算法调节了PID的参数，所以这个跟随效果也还不错。

而模糊控制器的响应如下：

|  |
| --- |
|  |

这样对比十分明显，因为模糊控制明显超调更小且更贴近输入曲线。

**（2）稳定性比较**

我们考虑到实际钻机工作的环境，阻力可能不是均匀的，这样就会使得机器转动的惯性增大，对应到传递函数中即是G0的分母中一次项系数变大，即系统阻尼值减小，这样可以看出我们控制的鲁棒性：

先给出此时机械部分传递函数：

|  |
| --- |
|  |

这时的模糊控制器阶跃响应：

|  |
| --- |
|  |

依旧有较好的性能。

PID控制器阶跃响应：

|  |
| --- |
|  |

可以看出，使用现代优化算法确定的PID参数无法做到对许多实际系统的适应，然而实际上，系统的辨识是困难的，往往我们需要对无法辨识数学模型的系统设计控制器，这时模糊控制的优势就体现出来了。

综上所述，模糊控制的本质是分治的思想，这使得一个模糊控制器对多个系统具有较好的控制能力，具有较强的稳定性。若实际采用控制器，就本次实验而言，模糊控制器是最优解。

# 改进思路

在仿真过程中，虽然模糊控制实际效果较好，但是我们也发现了模糊控制的一些不足之处：

1. 对论域的选择依赖。在实际仿真中，我们往往会因为模糊控制的输入不在自定义的输入范围内而导致无法找到对应的输出，这使得我们不得不不断修改模糊控制器的论域，才能达到较好的实验效果。

2. 模糊控制表的修改意义不明确。在修改模糊控制表时，每次修改产生的作用都是未知的，虽然可以根据PID控制的原则，但是实际的仿真往往没有体现这些原则的作用，所以需要每次修改后仿真，较为繁琐。

针对此，我们有如下改进思路：

1. 可以根据遗传算法优化PID参数的结果，确定一个最优的PID参数范围，并将此作为系统PID控制器的初始值，并由此确定输入的论域。

2. 将前文仿真的控制器输出改为PID各个系数的增量，这样设置PID的各个系数初始值为某一有较好效果的控制系数即可，不用考虑KP、KI、KD的取值范围，以实现较好的控制效果和稳定性。

具体的模糊控制系统设计如下：

|  |
| --- |
|  |

# 总结与展望

## 总结：

我们小组对于本次海底隧道钻机系统的研究，就大概方向来说采用了经典控制方法和现代控制方法。我们通过对多种控制方法的最优解参数的寻找，探寻每种控制方法对于本系统的稳态误差和动态性能的影响。传统控制方法我们做了PD控制、测速反馈控制方法、PID控制，对于PD控制，我们采用遗传算法求得其对应的最优参数，使得本种控制方法在传统控制方法里面显得效果最好。在现代控制方法中，我们利用模糊控制对PID控制参数进行改良，并将利用了模糊控制下的PID和传统PID对比；在跟随能力和稳定性分析进行比较，发现利用了模糊控制的系统在这几方面都表现的很好，是几种控制方法中的最优解。当然模糊控制也有自身的不足，所以传统控制方法和现代控制方法取长补短，互相结合才能使控制效果达到最佳。

## 展望：

在目前研究系统复杂性的提升，系统数学模型的难以建立，传统控制方法很难胜任目前控制需求时，现代控制理论提供的一些新的方法如自适应控制和本文用到的模糊控制等必将发挥他们的作用。本文粗略的使用模糊控制来对PID参数进行调整，效果已是几种控制方法中的最优解。相信在处理实际多系统、复杂系统的控制问题时，模糊控制等一系列现代控制方法肯定也会达到令人满意的控制要求。

# 参考文献

* 1. 刘晓红，韦鲁滨，于海洋.基于无模型自适应的粗煤泥分选控制系统研究［J］.中国矿业，2020，29（2）：81-87.LIU Xiaohong，WEI Lubin，YU Haiyang.Research on control sys⁃tem of coarse slime separator based on model-free adaptive［J］.Chi⁃na Mining Magazine，2020，29（2）：81-87.
  2. 赵峰,罗雯,高锋阳,等.考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制[J].西安交通大学学报,2020,54(6):28-35.
  3. 韩俊峰. 永磁同步电机伺服系统的自适应模糊滑模控制研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.
  4. 郭磊磊,金楠,李琰琰,等.基于滑模观测器的并网逆变器无交流电压传感器模型预测控制[J].电力自动化设备,2020,40(6):108-114.
  5. 刘婉慈.永磁同步电机调速系统的控制策略研究[D].兰州：兰州理工大学,2014.
  6. Vishal V, Bhim S, Ambrish C. Power conditioner for Variable-Frequency drives in offshore oil Fields[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2): 731-739.
  7. 李伟力，李守法，谢颖，等.感应电动机定转子全域温度场数值计算及相关因素敏感性分析[J]．中国电机工程学报，2007，27(24)：85-91．
  8. Roshan S, Bjorn G. Nonlinear optimization and control of an electric submersible pump lifted oil field[C]. Proceedings of International Conference on Modelling, Identification & Control (ICMIC), 2013.
  9. 边永生. 烟草设备修理技师培训教材[G]. 上海：国家烟草 专卖局职业技能鉴定指导中心，2002.
  10. 国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范［M］.北京：中央文献出版 社，2003.
  11. 姚光明，邓国栋，王慧. 松散回潮回风温度对云南烟叶加工 物 理 质 量 和 感 官 质 量 的 影 响［J］. 烟 草 科 技 ，2009（12）： 10-12.
  12. 孙增析. 智能控制理论［M］. 北京：清华大学出版社，1997.
  13. 杨虹琦，周冀衡，罗泽民，等. 不同产区烤烟中质体色素及 其 降 解 产 物 的 研 究［J］. 西 南 农 业 大 学 学 报 ，2004，26： 5640-5644.
  14. 过伟民，尹启生，宋纪真，等. 烤烟质体色素含量的品种间 差 异 及 其 与 感 官 质 量 的 关 系［J］. 烟 草 科 技 ，2009（8）： 50-55.
  15. 王积伟, 吴振顺.控制工程基础[ M] .北京:高等教育 出版社, 2001.
  16. 李洪人.液压控制系统[ M] .北京:国防工业出版社,1988.
  17. 韦 巍.智能控制技术[ M] .北京:机械工业出版社, 2001.
  18. 张国良.模糊控制及其 MATLAB 应用[ M] .西安 :西安 交通大学出版社, 2002.
  19. 张化光, 何希勤.模糊自适应控制理论及其应用[ M] . 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.
  20. 齐建玲, 赵秀芬, 褚 泽.一种自整定模糊PID 型控制器 的设计[ J] .华北航天工业学院学报, 2001, 11( 4) :25-31.
  21. 张 涛, 李家启.基于参数自整定模糊 PID 控制器的设 计与仿真[ J] .交通与计算机, 2001( 增刊) :27-29.
  22. 姜 平, 宋文忠.神经元自适应 PID 控制器的研究[ J] . 工业仪表与自动化装置, 1997, ( 4) :11 -13.
  23. 王积伟, 陆一心, 吴振顺.现代控制理论与工程[ M] . 北京:高等教育出版社, 2003 .
  24. Ho W K, Hang C C, Cao L S .Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications[ J] .Automatica, 1995, 31: 497 -502.
  25. Ho W K, Lim K W, Xu W.Optimal gain and phase margin tuning for PID controllers[ J] .Automatica, 1998, 34:1009 -1014
  26. Ho W K, Lim K W, Hang C C, et al .Getting more phase margin and performance out of PID controllers[ J] .Automatica, 1999, 35: 1579 -1585.