

电气学院电气工程系

《电力拖动自动控制系统》课程项目总结报告

项目名称: 双闭环直流脉宽调速系统设计 .

项目组号: 2 .

姓 名: 胡玥 周永健 张元玮 王丹 .

孙才植 孙正浩 李嘉栋 邢贺.

2017年5月22日

**双闭环直流脉宽调速系统设计**

作者：胡玥 周永健 张元玮 王丹 孙才植 孙正浩 邢贺 李嘉栋

（燕山大学电气工程学院）

**摘要**

随着电力电子技术的迅速发展，研究电动机的调速系统和调速性能有着广阔的市场前景。本项目研究的是双闭环直流调速系统，相比于单闭环调速系统，直流双闭环调速系统的性能较好，具有调速范围广，精度高，动态性能好和易于控制等优点，在工业领域中得到了广泛的应用。本项目着重对于双闭环系统的电路、调节器进行了设计，通过仿真和实验调试对所涉及的闭环系统进行验证和调试，从而证明了所涉及的双闭环系统符合设计要求。

**关键词**：双闭环，直流调速系统，PI调节器，无静差

目录

[绪论 2](#_Toc483516963)

[1 .闭环调速系统原理 3](#_Toc483516964)

[2 .单闭环直流调速系统电路设计 3](#_Toc483516965)

[2.1 参数及设计要求 3](#_Toc483516966)

[2.2 转速反馈单闭环直流调速系统 4](#_Toc483516967)

[2.2.1 单闭环直流调速系统模型 4](#_Toc483516968)

[2.2.2 单闭环电路原理图 5](#_Toc483516969)

[2.2.3 单闭环参数设计 6](#_Toc483516970)

[2.2.4单闭环调速系统仿真 6](#_Toc483516971)

[3 .双闭环直流调速系统电路设计 10](#_Toc483516972)

[3.1 参数及设计要求 10](#_Toc483516973)

[3.2 双闭环直流调速系统模型建立 10](#_Toc483516974)

[3.3 双闭环电路原理图 11](#_Toc483516975)

[3.4 调节器设计 12](#_Toc483516976)

[3.4.1开环系统参数 12](#_Toc483516977)

[3.4.2电流调节器设计 13](#_Toc483516978)

[3.4.3转速环环设计 15](#_Toc483516979)

[4. 双闭环直流调速系统仿真图 17](#_Toc483516980)

[4.1 双闭环系统PSIM电路仿真 17](#_Toc483516981)

[4.2双闭环系统MATLAB仿真结构图 19](#_Toc483516982)

[4.3电流反馈线掉线 21](#_Toc483516983)

[4.4转速反馈线掉线 22](#_Toc483516984)

[5参考文献 24](#_Toc483516985)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **胡玥** | **周永健** | **王丹** | **张元玮** | **邢贺** | **李嘉栋** | **孙正浩** | **孙才植** |
| **胡玥** |  | **A** | **A** | **B** | **B** | **C** | **D** | **C** |
| **周永健** |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **王丹** | **A** | **A** |  | **B** | **B** | **B** | **B** | **B** |
| **张元玮** |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **邢贺** | **A** | **A** | **B** | **B** |  | **C** | **D** | **C** |
| **李嘉栋** | **A** | **A** | **B** | **B** | **B** |  | **C** | **D** |
| **孙正浩** | **A** | **B** | **B** | **C** | **C** | **D** |  | **D** |
| **孙才植** | **A** | **B** | **A** | **B** | **B** | **C** | **D** |  |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **姓名** | **胡玥** | **周永健** | **王丹** | **邢贺** | **张元玮** | **李嘉栋** | **孙正浩** | **孙才植** |
| **评分** | **A** | **A** | **B** | **B** | **C** | **C** | **C** | **D** |

绪论

电动机是用来拖动某种生产机械的动力设备，所以需要根据工艺要求调节其转速，而用于完成这项功能的自动控制系统就被称为调速系统。目前调速系统分为交流调速和直流调速系统，由于直流调速系统的调速范围广、静差率小、稳定性好以及具有良好的动态性能，因此在相当长的时间内，高性能的调速系统几乎都采用直流调速系统。

本次项目的主要内容就是对直流调速系统进行设计，包括单闭环直流调速系统与双闭环直流调速系统。其中包括主电路与控制电路的选择，转速调节器与电流调节器的设计，以及通过设置调节器的参数来改变闭环系统的性能，达到调节转速的目的。

# .闭环调速系统原理

为了实现转速和电流两种负反馈分别起作用，在系统中设置两个调节器分别调节转速和电流，即分别引入转速负反馈和电流负反馈。把转速调节器的输出当作电流调节器的输入，再用电流出去控制力调节器的输入，再用电流调节器的输出去控制力子变换器 UPE。从闭环结构上看，电流在里面，称作内环；转速外边，称为外环。这就形成了转速、电流双闭调系统。

ASR （转速调节器）根据给定电压𝑈𝑛\* 和速度反馈电压𝑈𝑛的偏差进行调节，其输出是电流指令的给定信号 𝑈𝑖∗。ACR（电流调节器）根据𝑈𝑖∗和电流反馈𝑈𝑖的偏差进行调节，其输出是UPE（电力子变换器）的控制压𝑈𝑐。进而调节UPE的输出，即电机的电枢电压。由于转速不能突变，电枢电压改变后，电流跟着发生化相应的电磁转矩也跟着变化，只要电磁转矩与负载转矩不相等，转速将会发生变化，相应的电磁转矩也跟着变化。当转速达到设定值时，ASR 输入信号偏差为零，转速不再变化，系统进稳定状态。

ASR 与 ACR 采用 PI 调节器结构时，被调量转速和电流可以实现无静差，调速性能更加优越。

# .单闭环直流调速系统电路设计

## 参数及设计要求

1.电动机参数：,,，电枢电阻，电枢回路总电阻，电枢电感,转动惯量。



2.测速发电机TG参数：，。

3.完成转速反馈单闭环直流调速系统设计，要求转速调节无静差， （80~800r/min）,超调量。

4.在实验室完成转速反馈单闭环直流调速系统的实验。

## **转速反馈单闭环直流调速系统**

开环调速系统只适用用于对调速精度要求不高的场合，但许多需要无级调速的生产机械为了保证加工精度，常常对调速精度提出要求，这时，开环调速已不能满足要求，所以设计出了单闭环直流调速系统。

### 单闭环直流调速系统模型

图2-1单闭环调速系统模型图

单闭环调速系统结构模型如图2-1所示，由图可见，该系统的控制对象是直流电动机M，被控量是电动机的转速n，脉冲触发及整流电路为功率放大和执行环节，由运算放大器构成的比例积分调节器为电压放大和电压(综合)比较环节，电位器RP1为给定元件，测速发电机TG与电位器RP2构成转速检测元件，得到检测电压𝑈𝑛 = 𝛼𝑛，与给定电压作差得到偏差信号，送到比例积分调节器的反相输入端，其输出电压𝑈𝑐经放大送到电力电子变换装置中并带动直流电动机运行。

直流电动机全电压起动时，如果没有限流措施，会产生很大的冲击电流，这不仅对电机换向不利，对过载能力低的电力电子器件来说，更是不能允许的。为了解决反馈闭环调速系统的起动和堵转时电流过大的问题，系统中必须有自动限制电枢电流的环节。一旦电枢电流超过截止电流𝐼𝑑𝑐𝑟，稳压管VS反向击穿，给晶体三极管VBT提供电压使它导通，使PI调节器的输出电压𝑈𝑐接近于0，电力电子变换器UPE的输出电压𝑈𝑑急剧下降，达到限流的作用。

### 单闭环电路原理图

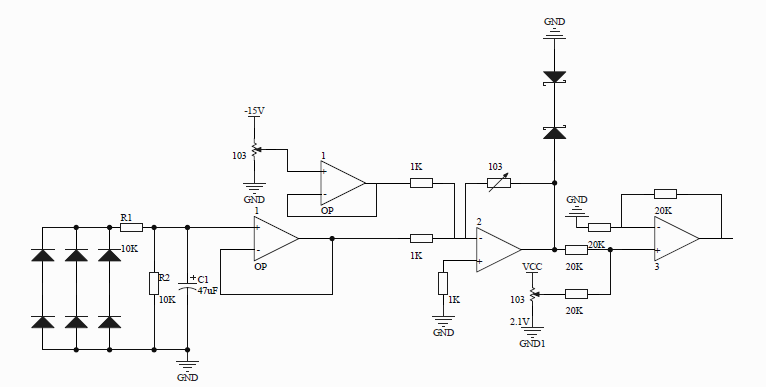
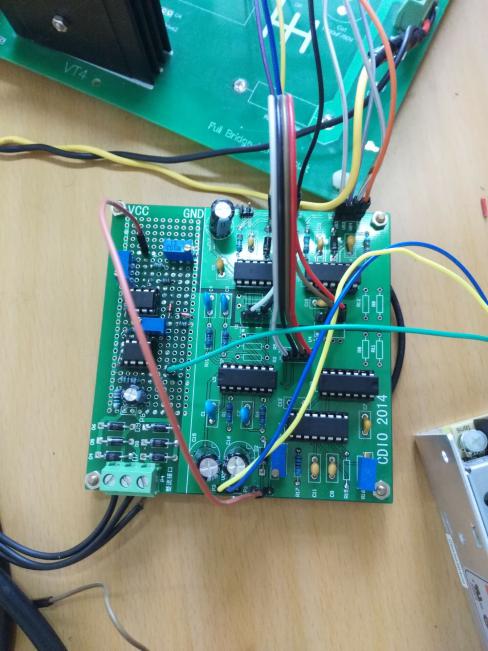
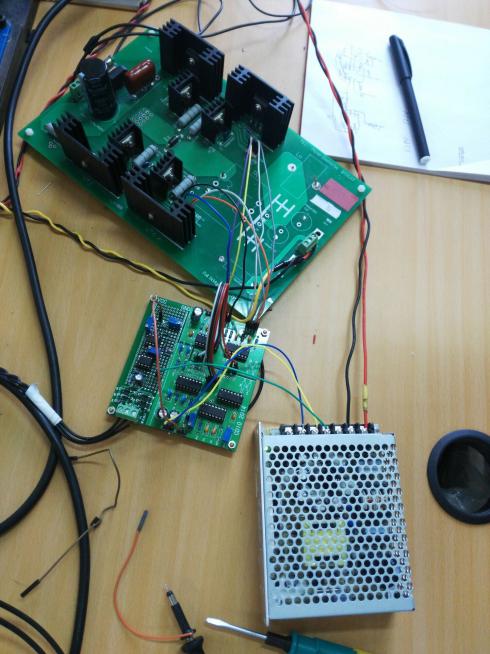
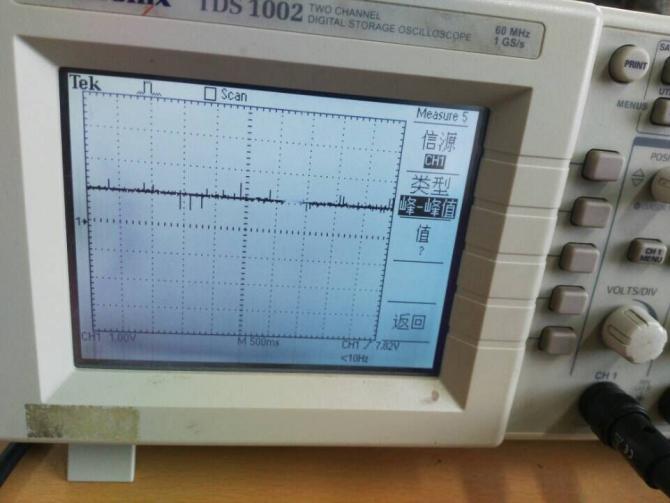


图2-2单闭环电路原理图

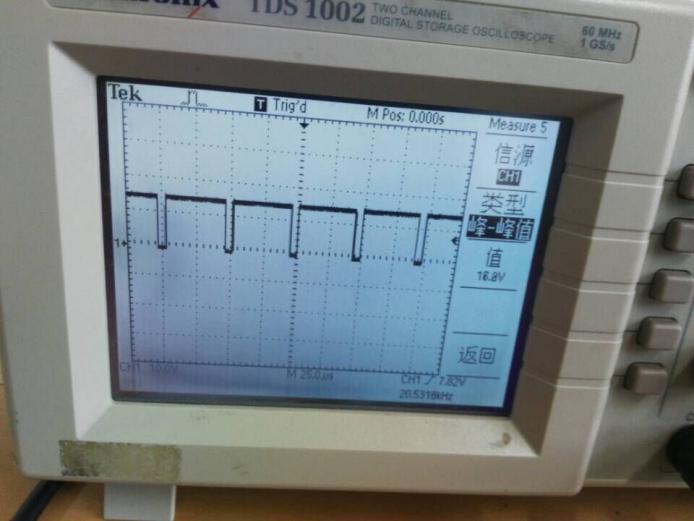
如图2-2所示，电容C1两端的电压就是转速反馈电压Un，Un后面的运放用作电压跟随器，起隔离的作用；由-15v电源通过调节滑动变阻器的阻值，即可调节给定电压-Un\*的大小，经分压电阻，得到-Un\*，第二个运放也是电压跟随器，对-Un\*起隔离作用；Un及-Un\*做加法后的值经过第三个运放（比例调节器）后进行放大，比例系数为（R为第二个滑动变阻器的阻值），比例调节器的输出用稳压管加了限幅；第四个运放为加法器，其输出为：，其中，为第三个运放的输出，用电位器将15V分压得到的2.1v电压与比例调节器的输出电压相加，以解决为负的问题；加法器输出电压送入3525的2管脚。

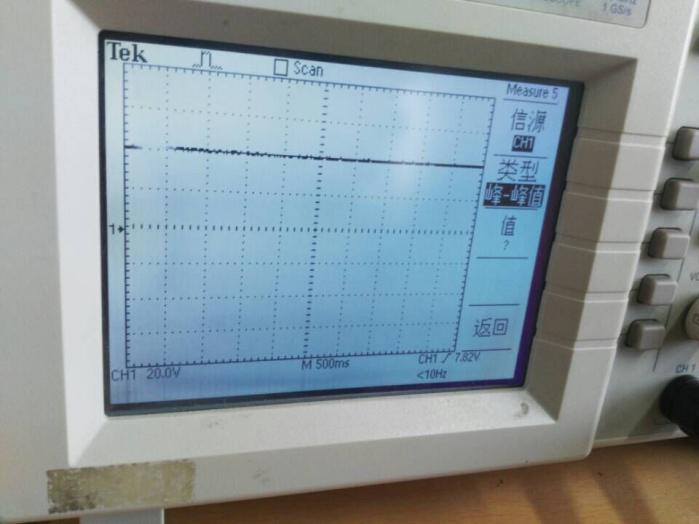
控制板连线示意图 主电路总体连接图



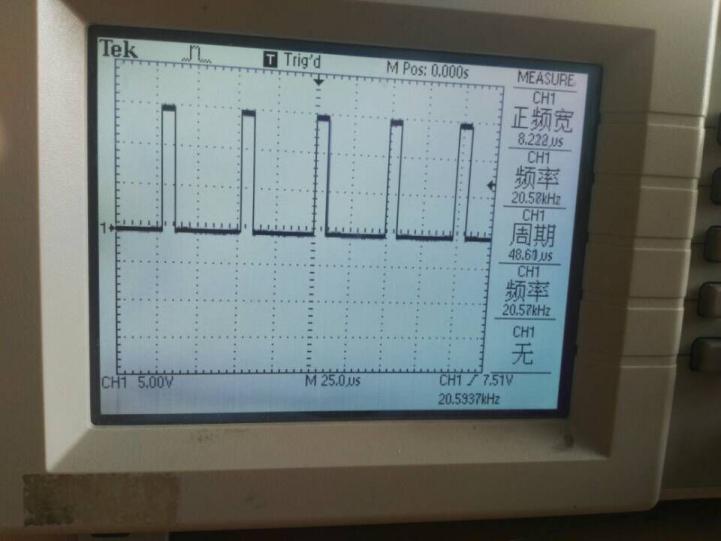
反馈输出波形



H桥控制信号波形



整流输出波形



SG3525倍频后波形

### **单闭环参数设计**

1.飞轮惯量：

 （2-1）

2.额定励磁下的电动机系数：

 （2-2）

3.额定励磁下电动机的转矩系数：

 （2-3）

4.电枢回路电磁时间常数：

， （2-4）

5.电力拖动系统机电时间常数：

 （2-5）

6.滞后时间常数：

（频率为20KHZ） （2-6）

7.整流装置放大系数：

（2-7）

### 2.2.4单闭环调速系统仿真

1.单闭环系统PSIM仿真

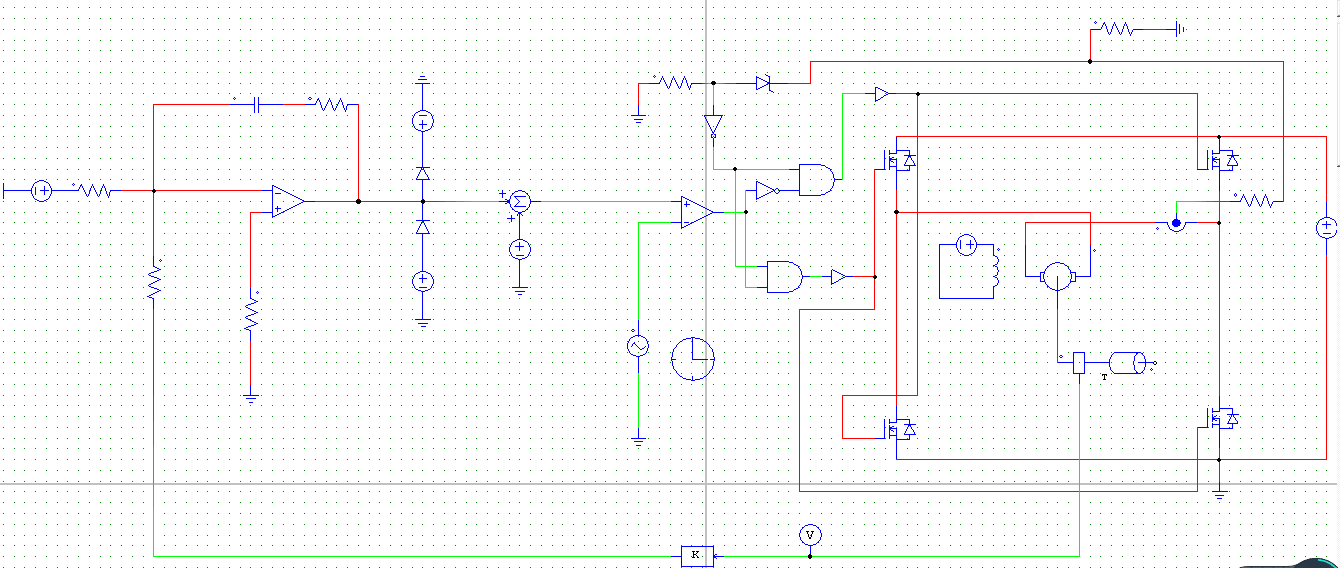


图2-3 PSIM单闭环仿真电路图

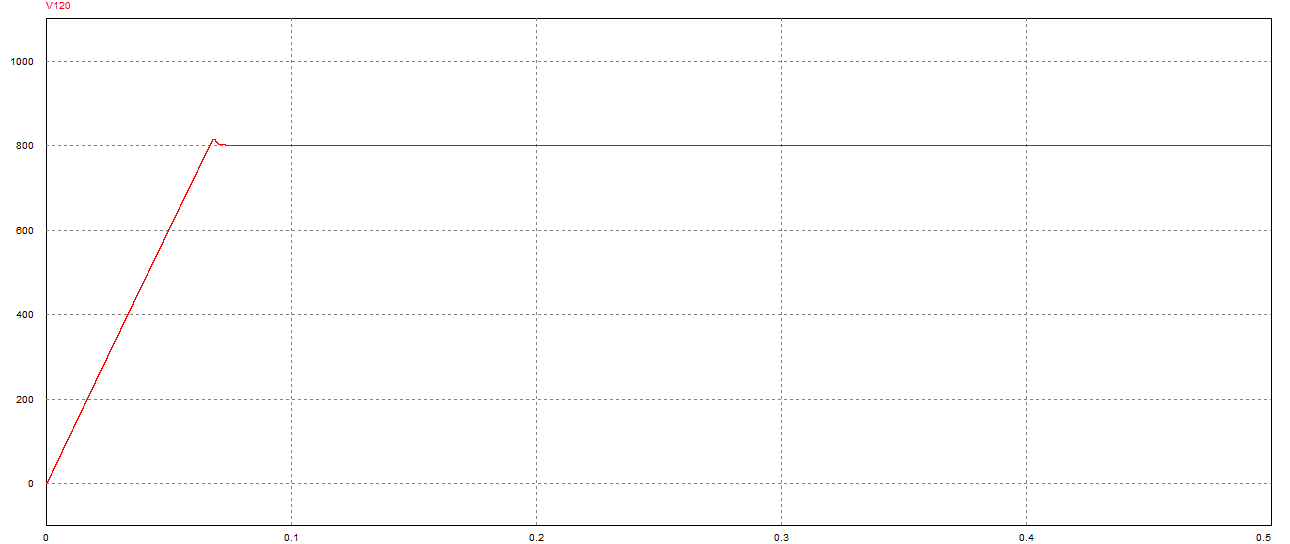


图2-4 PSIM单闭环800r/min仿真图

由图2-4可知，利用PSIM进行单闭环仿真时，电机的转速调整时间小于0.1s，超调量约为2.5%，符合设计要求。

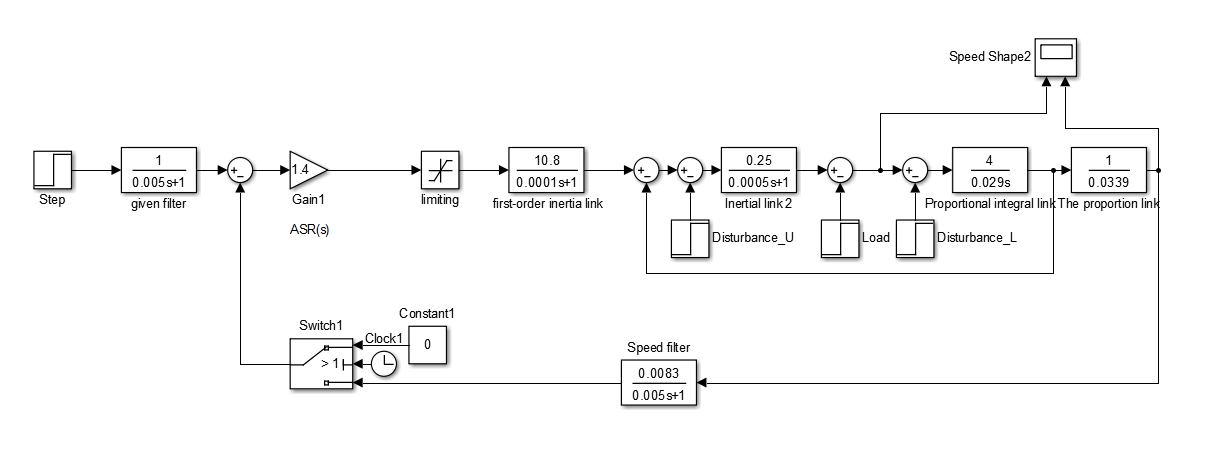
2.单闭环系统MATLAB仿真

图2-5单闭环MATLAB仿真电路图

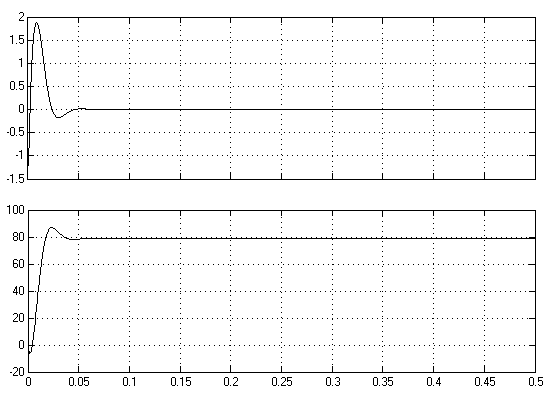


图2-6 单闭环转速80r/min仿真波形

由图2-6可以看出，当给予给定电压时，转速稳定输出80r/min，超调量为，满足超调小于30%的要求。

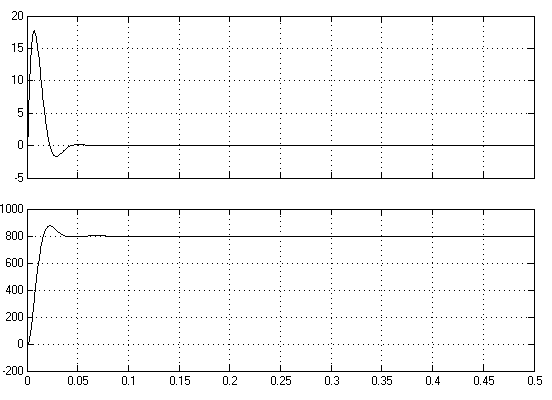
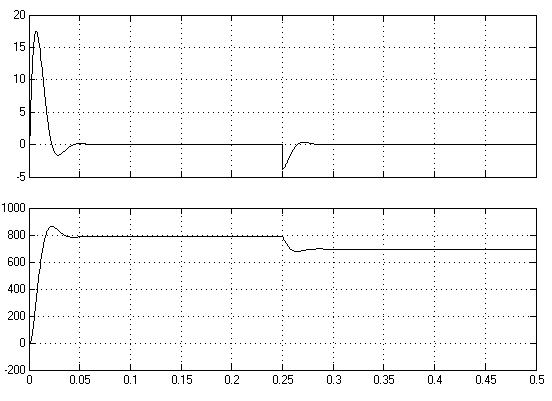


图2-7单闭环转速为800r/min时电流与转速波形

由图2-7可以看出，当给予给定电压时，转速稳定输出800r/min，超调量为，满足超调小于30%的要求。

图2-8 单闭环突加负载扰动波形图

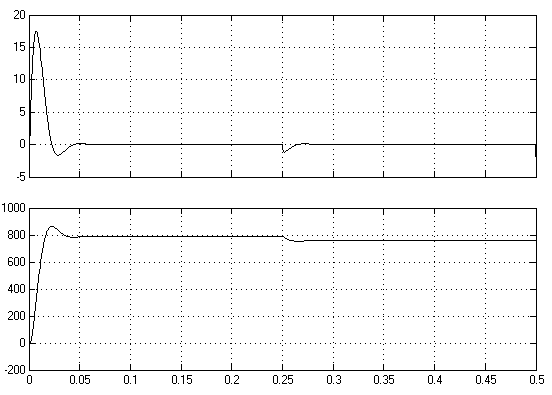
如图2-8可知，在0.25秒时加了负载扰动，可以看到最后转速仍然稳定在800r/min，由此可以说明闭环系统稳定。

图2-9单闭环突加电压扰动波形图

在0.25秒时加了电压扰动，可以看到最后转速仍然稳定在800r/min，由此可以说明闭环系统稳定。

# .双闭环直流调速系统电路设计

## 参数及设计要求

1.参数

（1）电动机参数：额定电压,额定电流,额定转速，电枢电阻，电枢回路总电阻，电枢电感,转动惯量。

（2）测速发电机TG参数：，

2.要求

（1）完成双闭环直流调速系统设计，要求转速环，电流环，起动时间，带额定负载起动。

（2）完成双闭环直流调速系统传递函数模型的搭建及仿真。

## 双闭环直流调速系统模型建立

为了实现在允许条件下的最快起动，需要获得一段使电流保持为最大值的恒流过程，按照反馈控制规律，采用电流负反馈可得到近似恒流过程，即在起动过程中只有电流负反馈，没有转速负反馈，达到稳态后，只需有转速负反馈，没有电流负反馈。为了实现转速和电流两种负反馈分别起作用，可在系统中设置两个调节器，分别调节转速和电流，即分别引入转速负反馈和电流负反馈。二者之间实行嵌套（串级）联接，如图3-1所示。把转速调节器的输出当作电流调节器的输入，再用电流调节器的输出去控制电力电子变换器UPE。从闭环结构上看，电流环在里面，称作内环；转速环在外边，称作外环。这就形成了转速、电流双闭环调速系统。

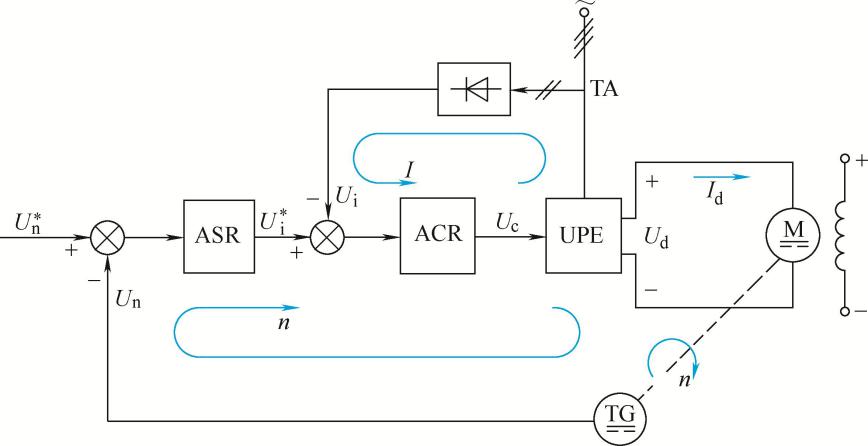


图3-1 转速、电流双闭环直流调速系统

ASR-转速调节器 ACR-电流调节器 TG-测速发电机 TA-电流互感器 UPE-电力电子变换器 -转速给定电压 -转速反馈电压

-电流给定电压 -电流反馈电压

## 双闭环电路原理图

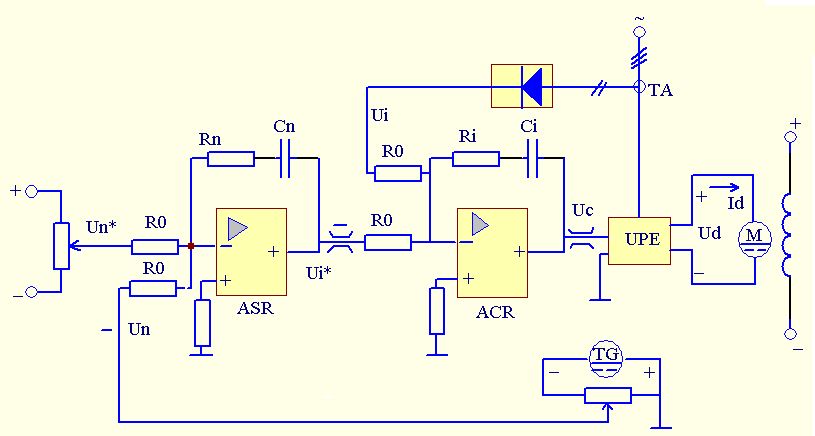
为了获得良好的静、动态性能，转速和电流两个调节器一般都采用PI调节器，这样构成的双闭环直流调速系统的电路原理图如图3-2所示。图中表示了两个调节器都是带限幅作用的，转速调节器ASR的输出限幅电压决定了电流给定电压的最大值，电流调节器ACR的输出限幅电压限制了电力电子变换器的最大输出电压。

图3-2双闭环直流调速系统原理图

## 调节器设计

按照设计多环控制系统先内环后外环的一般原则，从内环开始，逐步向外扩展。在双闭环系统中，应该首先设计电流调节器，然后把整个电流环看作是转速调节系统中的一个环节，再设计转速调节器。

双闭环调速系统实际电路图如图3-3所示，它包括电流滤波，转速滤波和两个给定信号的滤波环节。由于电流检测信号含有交流分量，为了不使它影响到调节器的输入，需加低通滤波。

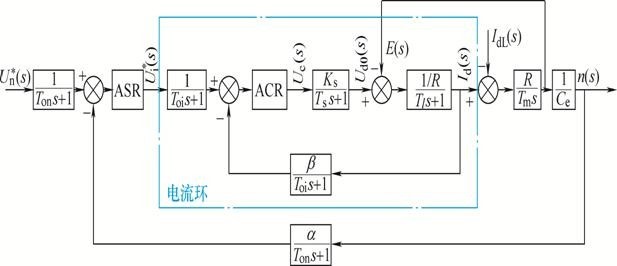


图3-3双闭环调速系统实际电路图

### 3.4.1开环系统参数

1.根据电机固有参数可得到以下开环系统数据：

1. 电枢回路电磁时间常数：

 （3-1）

1. 额定励磁下电动势系数：

 （3-2）

1. 电力拖动系统机电时间常数：

 （3-3）

1. 滞后时间常数：

 （3-4）

1. 电流环滤波时间常数：

 （3-5）

1. 整流装置放大系数：

 （3-6）

1. 电动机电枢电流过载倍数

γ=1.5 (3-7）

2.通过分析以上的数据，对电流环设计过程中的参数进行计算，可以得到以下参数结果：

（1）最大允许电流=1.5，限幅值，则

 （3-8）

（2）设电压给定，则转速给定系数：

 （3-9）

### 3.4.2电流调节器设计

从稳态要求上看，希望电流无静差，以得到理想的堵转特性，故采用I型系统即可。再从动态要求上看，实际系统不允许电枢电流在突加控制作用时有太大的超调，以保证电流在动态过程中不超过允许值，而对电网电压波动的及时抗扰作用只是次要的因素。为此，电流环应以跟随性能为主，即选用典型I型系统。

电流环的控制对象是双惯性型的，要校正成典型I型系统，需采用PI型的电流调节器，其传递函数为：

 （3-10）

#### 1.电流调节器参数设计

（1）为了让调节器零点与控制对象的大时间常数极点对消，选择

（2）电流环开环时间增益:要求，故应取，因此，其中，得

 （3-11）

（3）ACR的比例系数为：

 （3-12）

#### 2.近似条件检验

电流截止频率为

1. 晶闸管整流装置传递函数的近似条件：

 （3-13）

满足近似条件

1. 忽略反电动势变化对电流环动态影响的条件：

< （3-14）

满足近似条件

1. 电流环小时间常数近似处理条件：

> （3-15）

满足近似条件

#### 3.计算调节器的电阻和电容

取调节器输入电阻为，各电阻和电容值计算如下：

 取 （3-16）

，取 （3-17）

，取 （3-18）

#### 4.核算电流超调量

，满足设计要求。

### 3.4.3转速环环设计

#### 1.基本参数

（1）电流环等效时间常数：

 （3-19）

（2）转速滤波时间常数：

 （3-20）

（3）转速环小时间常数近似处理：

 （3-21）

#### 2.转速调节器结构选择

按照设计要求，选用PI调节器，其传递函数为：

 （3-22）

#### 3.转速调节器参数设计

（1）根据跟随性和抗干扰性能都较好的原则取，则ASR超前时间常数为

 （3-23）

（2）转速环开环增益：

 （3-24）

（3）ASR的比例系数：

 （3-25）

#### 4.近似条件检验

转速截止频率为：

 （3-26）

1. 电流环传递函数简化条件为

> （3-27）

满足简化条件

1. 转速环小时间常数近似处理条件为

> （3-28）

满足近似条件

#### 5.计算调节器电阻和电容

取调节器输入电阻 ，则

，取750 （3-29）

，取0.035 （3-30）

，取0.5 （3-31）

#### 6.校核转速超调量

，满足设计要求。

# 4. 双闭环直流调速系统仿真图

## 4.1 双闭环系统PSIM电路仿真

1.仿真原理图

根据双闭环系统原理及参数计算搭建PSIM仿真图如图4-1所示。

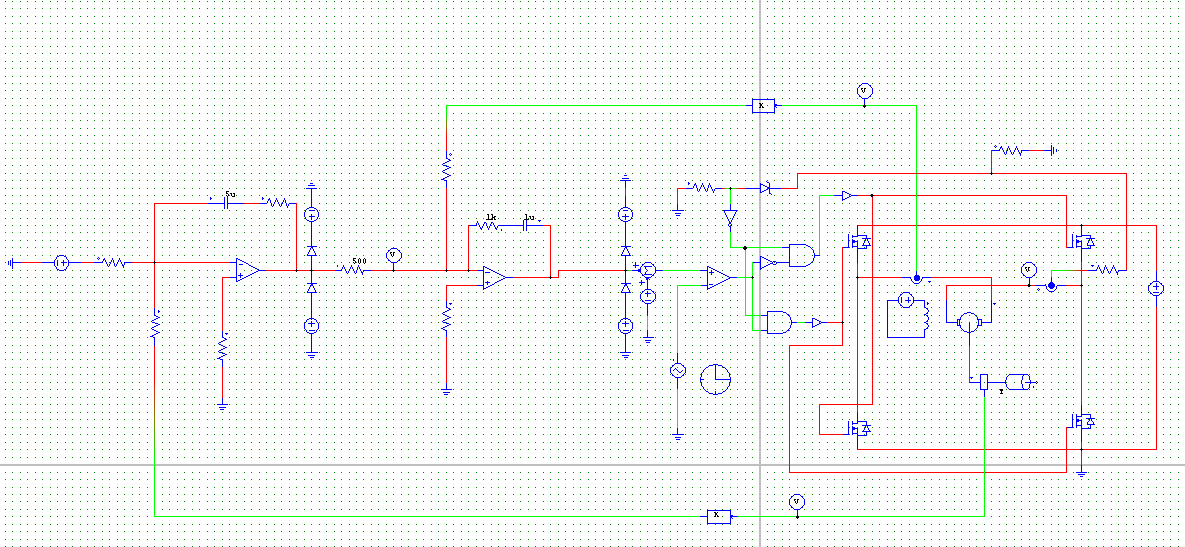


图4-1 PSIM仿真框图

2.轻载时的电流波形图

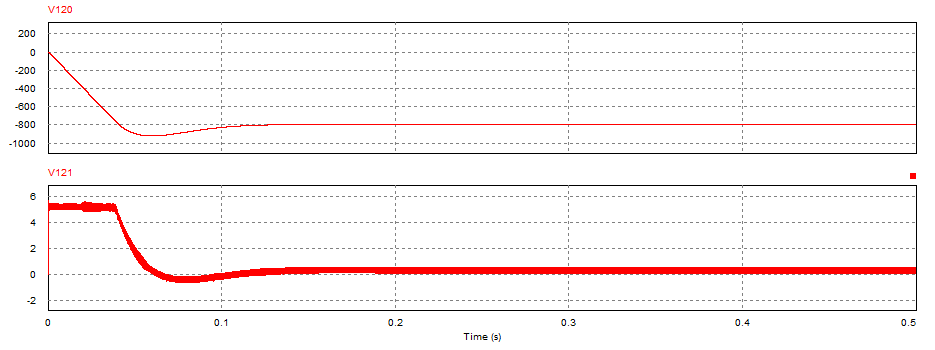
轻载时对电路进行PSIM仿真，波形图如图4-2和图4-3所示。 

图4-2 800r/min时电流波形图

由图4-2分析可知，与单闭环直流调速系统相比，在相同负载情况下，双闭环转速调节时间明显短于单闭环调速时间。

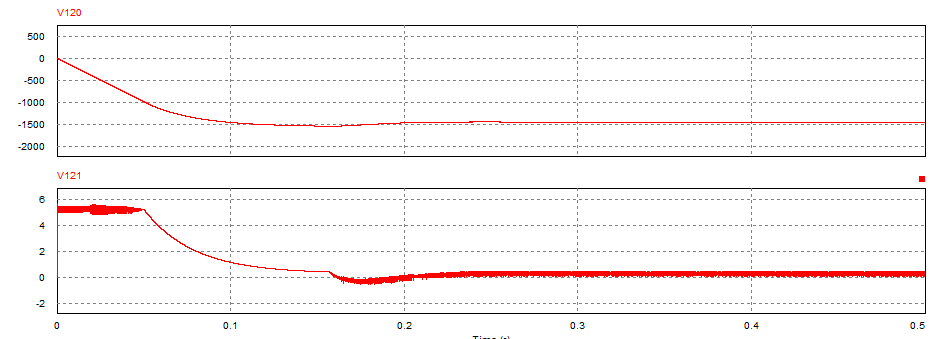


图4-3 1450r/min时电流波形图

由图4-3可知，双闭环系统的调速范围明显大于单闭环系统的调速范围。

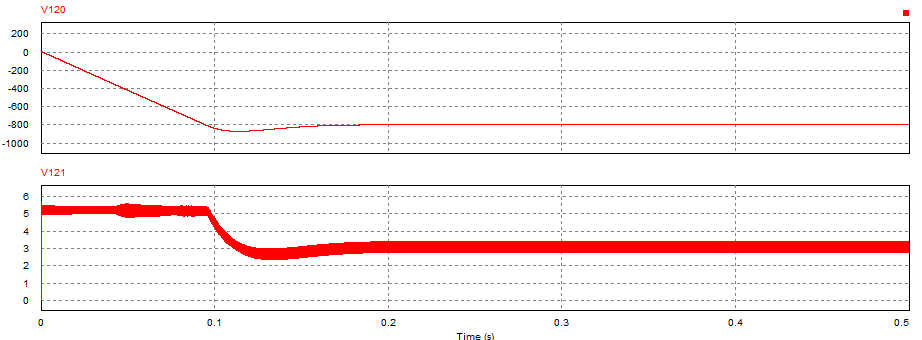
。

图4-4 800r/min加重载时仿真波形图

由图4-4可知，在带重载情况下，电机转速的调节时间变长，稳定时电枢电流变大，这与理论分析也是一致的。

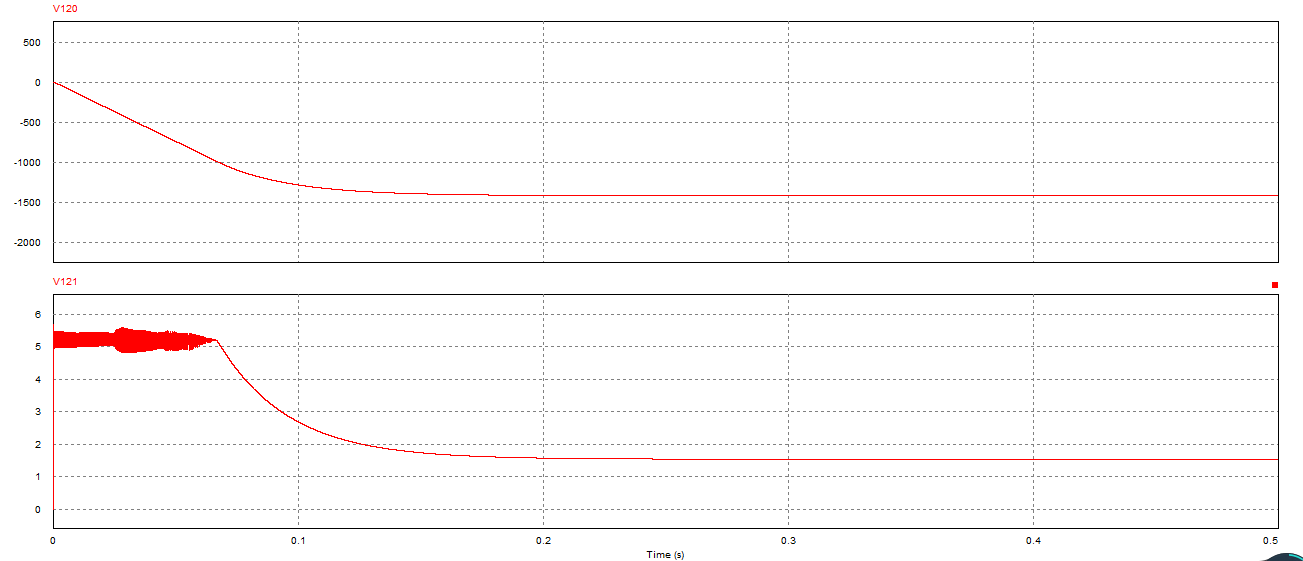


图4-5 1450r/min加重载时仿真波形

由图4-4与图4-5对比可知，当设定速度增加时，转速调节时间会变长，达到稳定时电枢电流也会略有下降，这同样与理论分析一致。

## 4.2双闭环系统MATLAB仿真结构图

1.仿真原理图

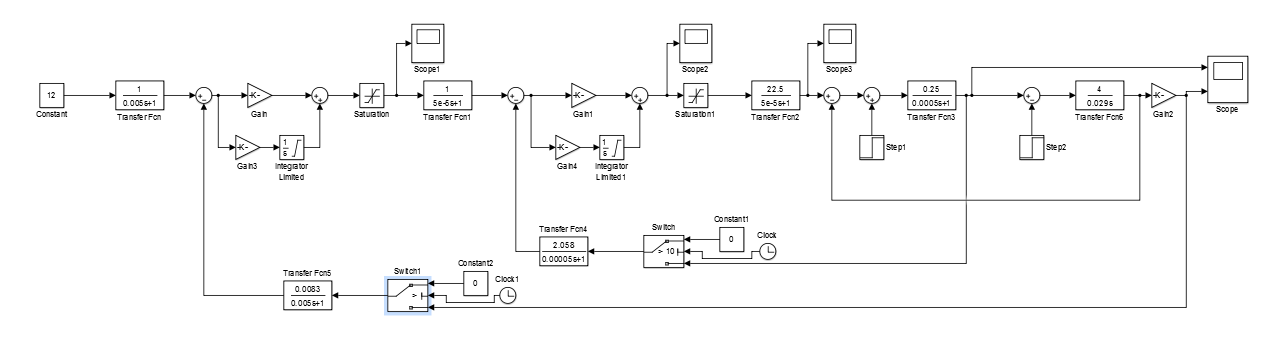
 根据额定励磁下的直流电机特性，建立动态仿真模型如图4-6所示。

图4-6 动态仿真结构图

2.双闭环系统额定负载起动波形图

电机在给定额定电压12V，额定电流3.24A的条件下起动的转速与电流波形图如图4-7所示。

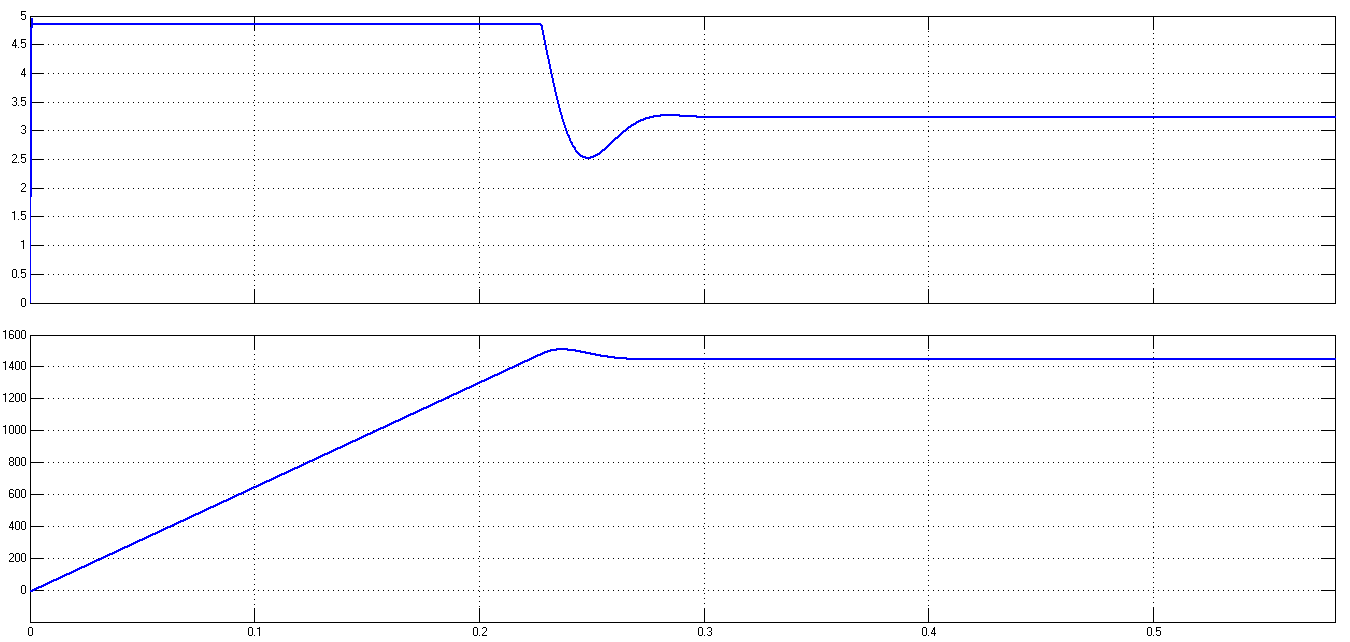


图4-7 双闭环系统额定条件起动波形图

由波形图可知，双闭环直流调速系统在起动过程中属于恒流起动，实现了“准时间最优控制”，转速略有超调，且要求范围之内。

3.双闭环系统额定负载起动加负载扰动波形图

双闭环直流调速系统在额定负载运行至0.4s时突加1A电流扰动时的波形图如图4-8所示。

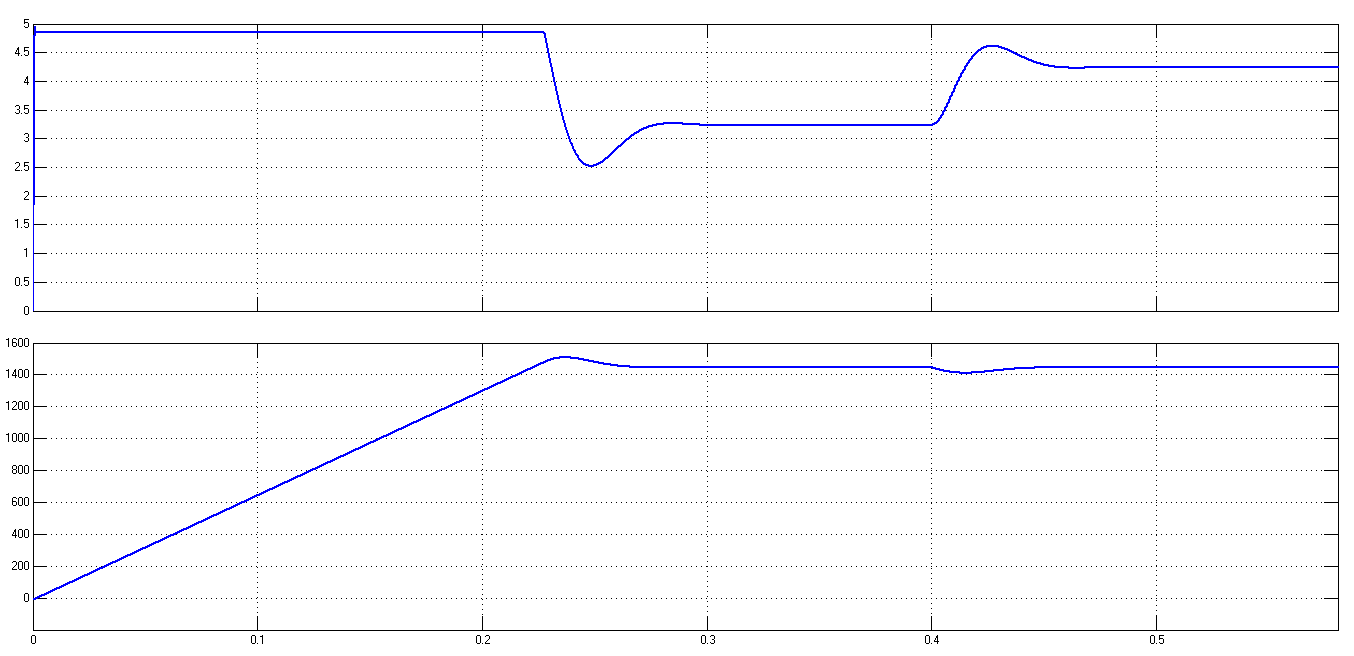


图4-8 双闭环系统0.4s时加入1A电流扰动时波形图

由转速波形可知，在突加负载扰动时，转速会有短暂的波动，但很快就恢复至原转速，实现了转速调节无静差。电流在短暂的调整后便会达到新的稳态值。

4.双闭环系统额定负载起动加电压扰动波形图

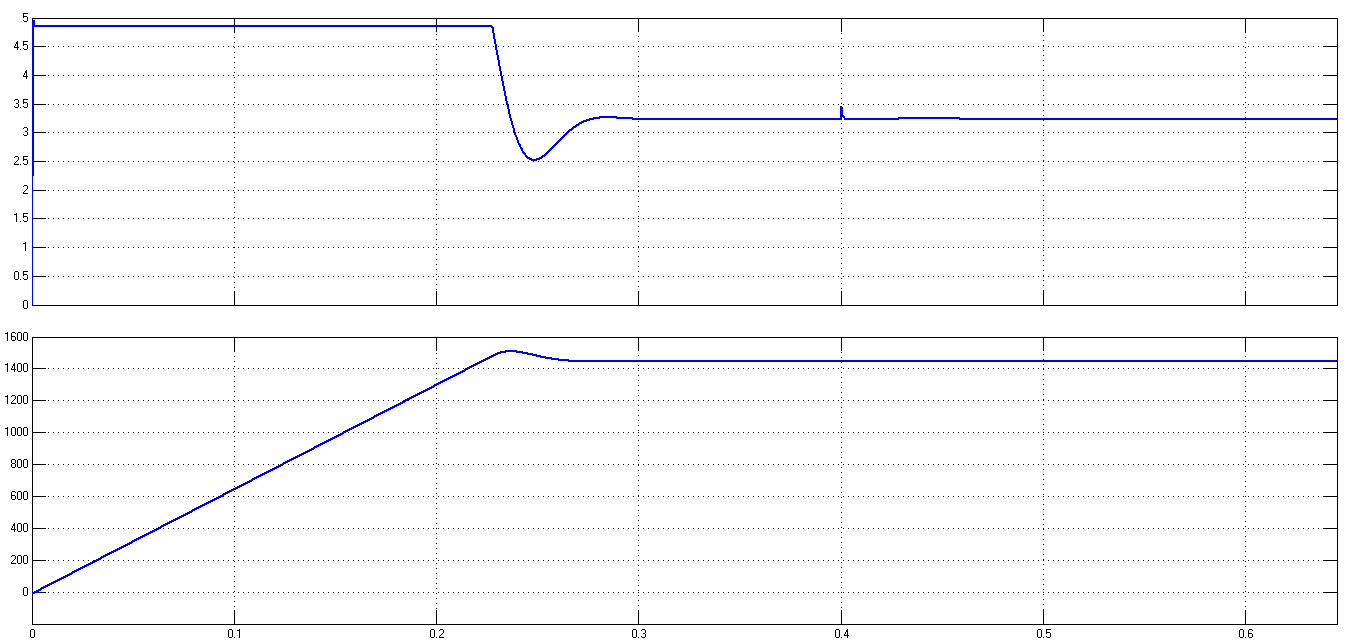
双闭环直流调速系统在额定负载运行至0.4s时突加3V电压扰动时的波形图如图4-9所示。

图4-9 双闭环系统0.4s时加入3V电压扰动时的波形图

由电流和转速波形可知，突加电压扰动后，转速环实现了无静差调节，电流经过短暂的时间也会恢复，实现了电流的无静差调节。

## 4.3电流反馈线掉线

1.电流反馈线在电机开始运行时就断线时的仿真波形图如图4-10所示。

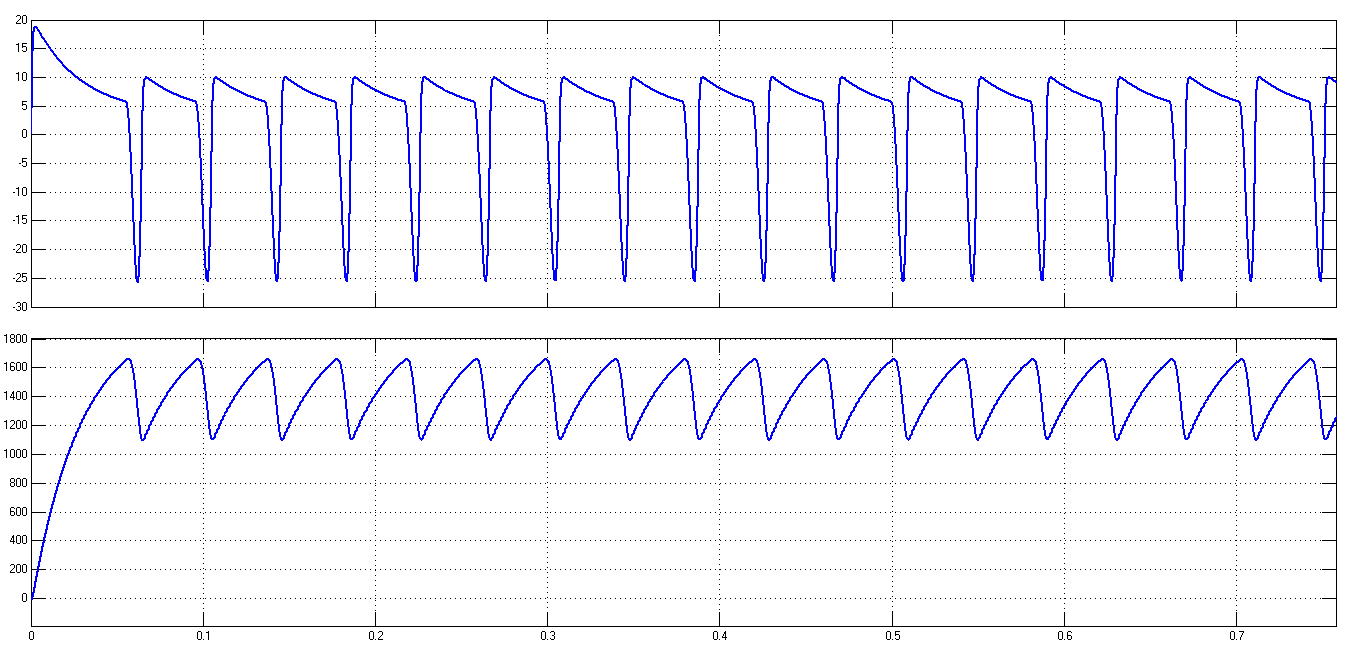


图4-10 开始电流反馈线掉线波形图

2．电流反馈线在电机额定运行过程中突然掉线时的仿真波形如图4-11所示。

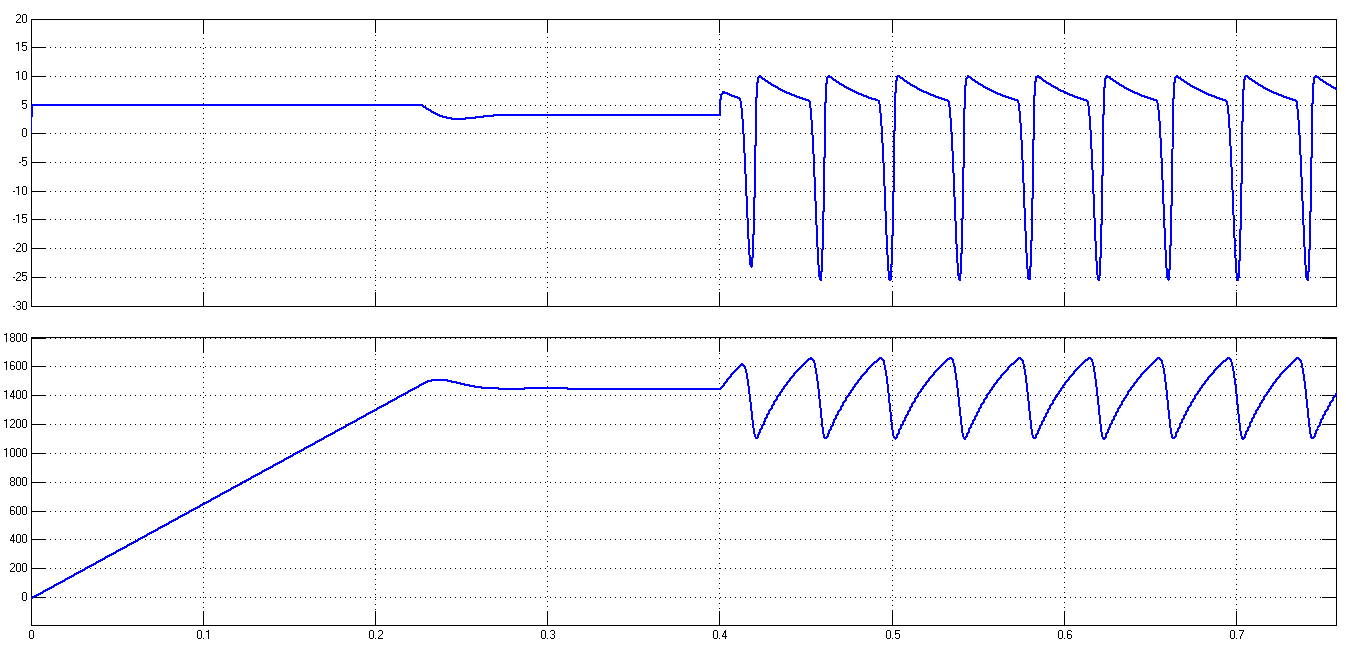
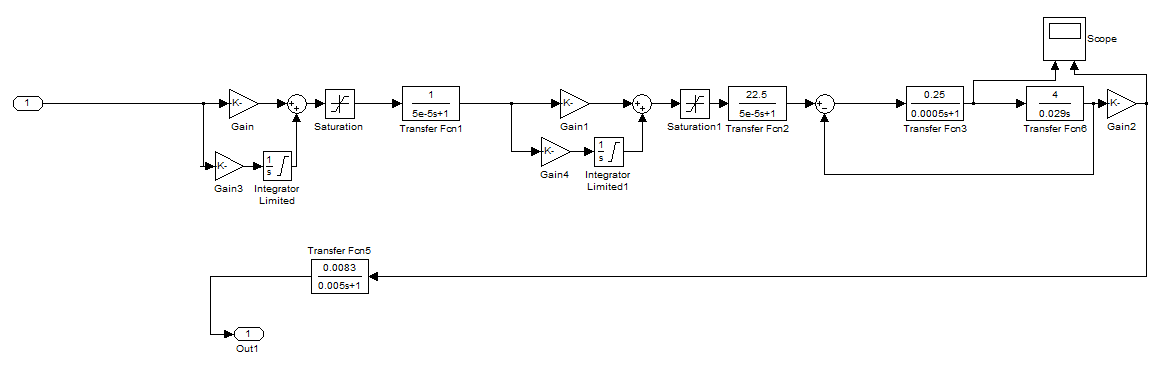


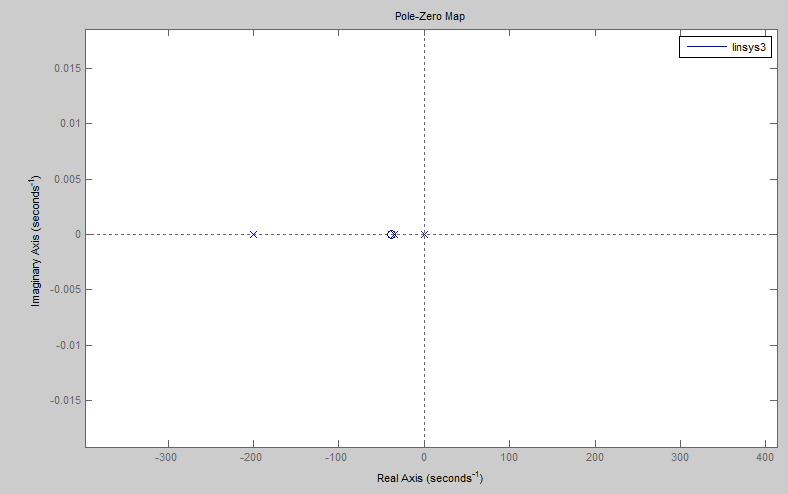
图4-11 电流反馈线在0.4s时突然掉线时的波形图

由在不同时间电流反馈线断线的波形图可知，在给定电压恒定时，电流反馈线断线，电流调节器输入偏差量为给定电压，电流环迅速饱和，ACR输出限幅值，，，电枢电流迅速上升，由于电磁转矩很大，所以转速也会上升，减小，直至为负且一直在减小，使得，ACR退饱和，减小，减小。当转速增大到最大值时，。此时由于ASR的作用，欲使系统稳定，需降低转速，电枢电流也相应减小，直至，。又由于，，，减小，增大。由此形成了电流和转速的震荡波形。

为此我们搭建了系统的开环传函，分析了系统的根轨迹和伯德图。

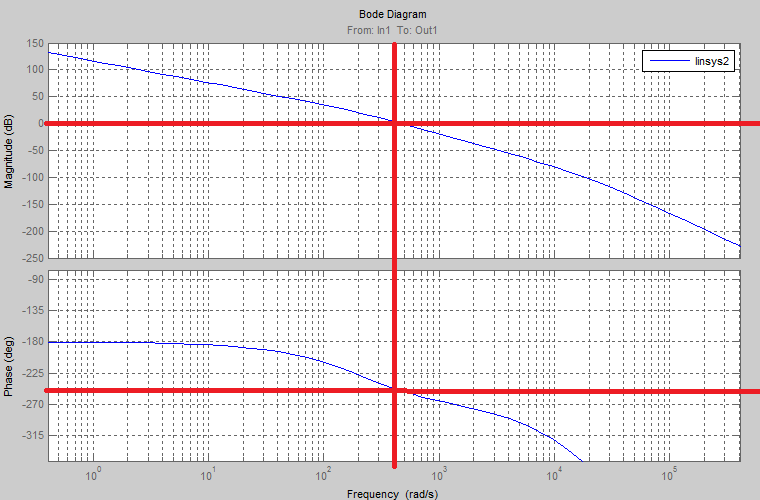


Matlab系统开环仿真原理图



系统开环根轨迹图

有图可见系统在复平面有一个极点落在原点，且右半平面无零极点，系统处于临界稳定状态。



Bode图

当系统幅值大于0时，开环传函只有一个起始于-180°的负半次穿越。

正穿越-负穿越≠P/2系统处于不稳定状态。

## 4.4转速反馈线掉线

1.转速反馈线在电机开始运行时就掉线时的仿真波形图如图4-12所示。

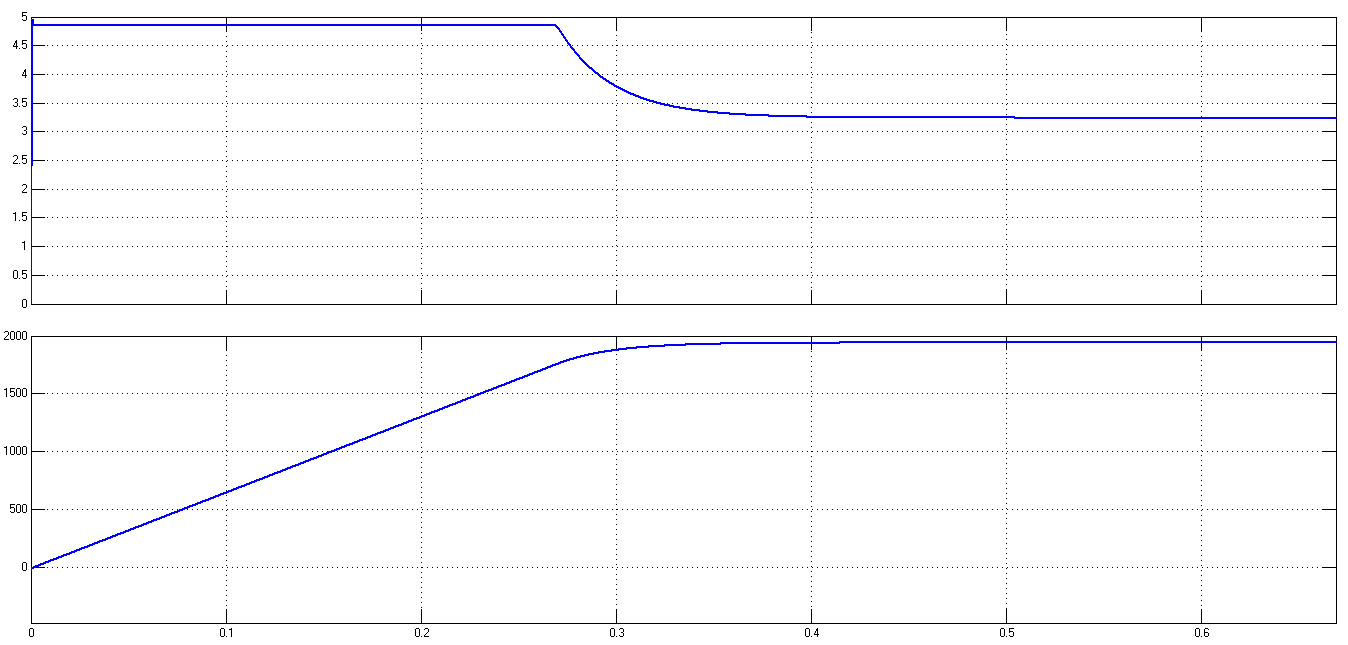


图4-12 开始转速反馈线掉线

2.转速反馈线在电机额定运行过程中突然掉线时的仿真波形图如图4-13所示。

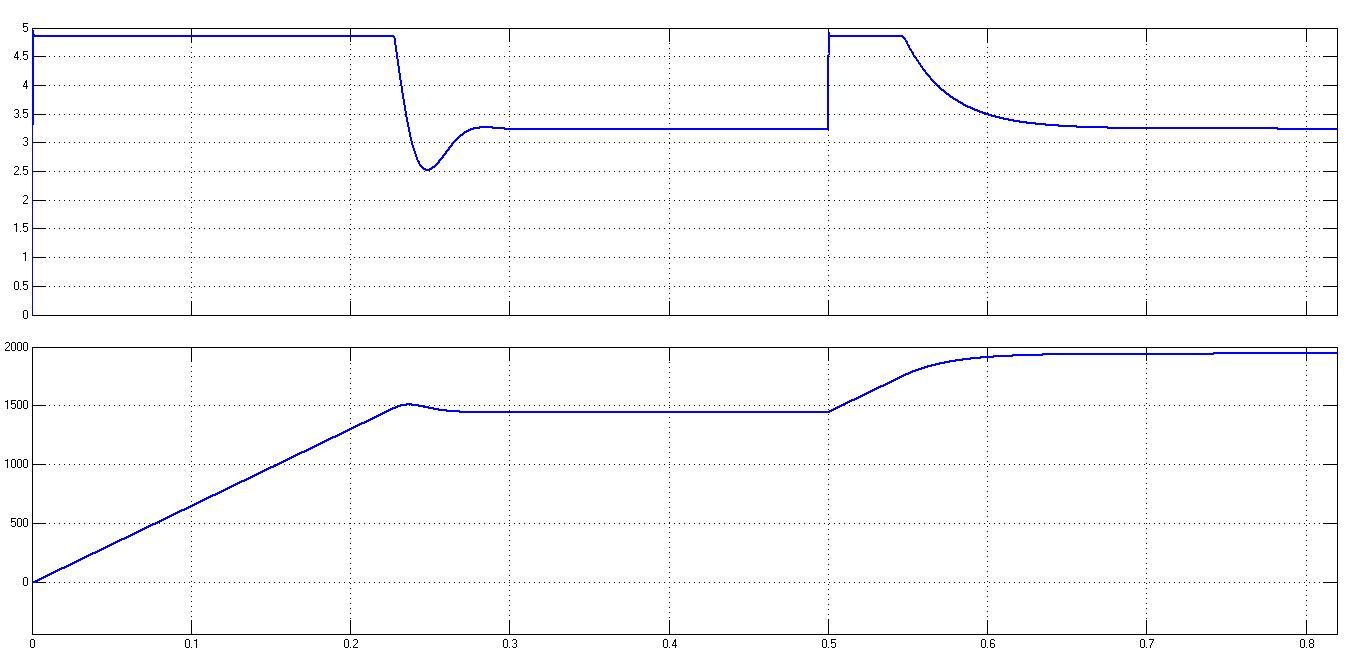


图4-13 转速反馈线在0.5s时掉线波形图

由以上两图分析可知，在转速反馈线断线时，转速反馈电压为0，转速调节器输入偏差电压最大，调节器饱和，其输出电压保持限幅值，转速环相当于开环，系统成为在恒值电流给定下的电流调节系统，保持最大电流恒定，加速度恒定，转速线性增长，直至电流转速环输出达到限幅值，转速增长减缓，电流下降，最终达到稳态。

# 5参考文献

1.陈伯时 电力拖动自动控制系统（第3版） 机械工业出版社 2003.7

2.王兆安 刘进军 电力电子技术（第5版） 机械工业出版社 2009.5

3.魏艳君 电力电子电路仿真 机械工业出版社 2012.8

4.翁贻方 自动控制理论（第4版） 机械工业出版社 2012.11