



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111756294 A

(43) 申请公布日 2020.10.09

(21) 申请号 202010647405.X

(22) 申请日 2020.07.07

(71) 申请人 武汉久同智能科技有限公司

地址 430070 湖北省武汉市江夏区大学园  
路13号华中科技大学科技园现代服务  
业基地1号研发楼17层

(72) 发明人 陈天航 苏小宇 江平 占颂  
凡文涛 周向东 宋宝 唐小琦

(74) 专利代理机构 北京金智普华知识产权代理  
有限公司 11401

代理人 杨采良

(51) Int.Cl.

H02P 21/18 (2016.01)

G06F 30/20 (2020.01)

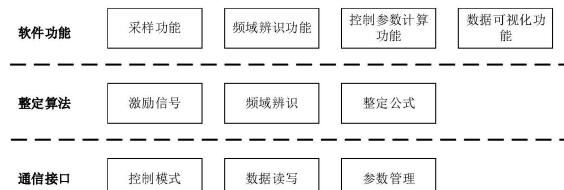
权利要求书2页 说明书10页 附图8页

(54) 发明名称

基于频率响应的速度环控制参数自整定伺  
服调整平台

(57) 摘要

本发明公开了一种基于频率响应的速度环  
控制参数自整定伺服调整平台，包括伺服调整软  
件层、速度环整定算法层和通信接口层，所述伺  
服调整软件层包括采样功能、频域辨识功能、控  
制参数计算功能和数据可视化功能，所述速度环  
整定算法层包括激励信号、频域辨识和整定公式，  
所述通信接口包括控制模式、数据读写和参数管  
理；本发明结合工程实践，兼顾伺服系统调  
整过程中动态数据实时交互需求及用户操作习  
惯，实现具有速度环自整定功能的可视化操作平  
台。该平台基于EtherCAT主站，其传输效率高，主  
站与从站交换数据的时间为微秒级，因此通过  
EtherCAT主站设计稳定安全的通信接口，并结合  
基于模型的速度环控制参数整定算法，实现具有  
速度环整定功能的伺服调整软件。



A

CN 111756294

CN

1. 一种基于频率响应的速度环控制参数自整定伺服调整平台，其特征在于：包括伺服调整软件层、速度环整定算法层和通信接口层，所述伺服调整软件层包括采样功能、频域辨识功能、控制参数计算功能和数据可视化功能，所述速度环整定算法层包括激励信号、频域辨识和整定公式，所述通信接口包括控制模式、数据读写和参数管理；

所述伺服调整软件层负责界面操作逻辑，结合整定算法接口与通信接口，实现通信数据显示、整定结果显示以及整定步骤引导；

所述速度环整定算法层提供整定算法接口，帮助软件计算控制参数；

所述通信接口用于通信数据的处理，提供数据管理与系统控制等接口，帮助软件完成整定过程中的数据交换与数据处理。

2. 根据权利要求1所述的基于频率响应的速度环控制参数自整定伺服调整平台，其特征在于：所述伺服调整软件层信号的采样、速度环控制参数优化以及数据可视化功能基于QT框架实现，采样功能用于下发采样参数与接收返回的数据，包括激励信号下发和采集反馈速度与阶跃响应数据；控制参数计算功能通过调用整定算法接口与通信接口，完成参数的计算与评价；数据可视化功能用于可视化通信数据，频率辨识功能中由于频率辨识算法采用Python完成，频率辨识功能由两部分组成，一部分是软件上的频率响应辨识流程控制，另外一部分是Python实现的计算程序，两部分基于TCP与共享内存混合通信的方式，实现辨识功能。

3. 根据权利要求1所述的基于频率响应的速度环控制参数自整定伺服调整平台，其特征在于：所述速度环整定算法层包括速度调节器、电流控制器、逆变器、交流伺服电机和整定算法，所述整定算法包括激励信号、参数辨识和整定公式，所述激励信号位于速度调节器与电流控制器之间，所述参数辨识位于速度调机器输入端，所述参数辨识输出至所述整定公式，整定供水传输至所述速度调节器，通过激励信号算法产生指令电流值，采集反馈速度，结合参数辨识算法，获取系统开环传递函数的幅频、相频数据；忽略伺服系统非线性因素，输入信号设置为，传递函数设置为，未加入噪声的输出结果为，噪声输入为，最终输出结果为，整合可得输入输出量关系为：

$$\begin{cases} z(t) = \int_0^\infty g(\lambda)u(t-\lambda)d\lambda \\ y(t) = z(t) + v(t) \end{cases} \rightarrow y(t) = v(t) + \int_0^\infty g(\lambda)u(t-\lambda)d\lambda \quad (1)$$

将式(1)的两边乘以  $u(t-\tau)$ ，然后计算数学期望可得：

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T z(t)u(t-\tau)dt &= \\ \int_0^\infty g(\lambda)d\lambda \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t-\lambda)u(t-\tau)dt \right\} + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t)u(t-\tau)dt & \quad (2) \end{aligned}$$

根据自相关(式3)与互相关函数(式4)的定义，可化简式(2)为式(5)；

$$R_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t+\tau)dt \quad (3)$$

$$R_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t+\tau)dt \quad (4)$$

$$R_{zu}(\tau) = \int_0^\infty g(\lambda)R_u(\tau-\lambda)d\lambda + R_{vu} \quad (5)$$

分析式(5),考虑输入信号 $u(t)$ 与噪声输入 $v(t)$ 的关系,对于斜坡信号、正弦信号等激励信号,频谱范围不够宽,无法充分激励辨识系统,并且与噪声信号具有一定的相关性,为避免系统工作在非线性区,减小输入信号对系统的扰动,消除噪声输入的影响,输入信号选择白噪声,不同时刻白噪声的互相关函数值为0,因此可得输入信号与白噪声输入的互相关 $R_{vu}$ 值为0;

当输入信号为白噪声时,对(5)进行傅里叶变换,可得关系:

$$G_{zu}(\omega) = H(\omega) G_u(\omega) \quad (6)$$

根据式(6)可知,伺服系统的传递函数与输入信号量的自功率谱的乘积等于输入信号量与输出信号量的互功率谱,而满足上述关系时激励信号需为白噪声,但在实际工程中,白噪声难以实现,因此输入信号使用PRBS信号。

## 基于频率响应的速度环控制参数自整定伺服调整平台

### 技术领域

[0001] 本发明涉及伺服驱动技术领域，尤其涉及一种基于频率响应的速度环控制参数自整定伺服调整平台。

### 背景技术

[0002] 随着高端装备高速高精的发展，伺服系统作为高端装备的运动执行机构，其高精度、高响应等高性能指标逐渐成为伺服系统的基本要求。在伺服系统三环控制结构中，速度环用于保证电机速度与指令速度的一致性，当负载转矩产生扰动时，能有效的降低负载带来的速度波动，增强电机的速度动态跟踪性能，提高整个系统的降噪能力。因此，快速且合理的调整速度环控制参数能有效的提高伺服系统的可靠性。

[0003] 传统的速度环控制参数调节依靠经验法，通过设置速度环控制参数，观察反馈速度曲线，经过合理的调整与测试，获取较优的控制参数，但传统的方法需要知识水平与经验水平较高的操作人员，无法有效地提升生产效率。

[0004] 在计算机上实现速度环控制参数整定功能已经逐步成为主流调整方式。这种方式使用传输时延低、带宽高且稳定的通讯协议，实时获取伺服系统的运行数据，并通过速度环控制参数整定算法，采用软件工程将操作流程可视化，提高参数整定效率。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的就在于为了解决上述问题而提供一种基于频率响应的速度环控制参数自整定伺服调整平台。

[0006] 本发明通过以下技术方案来实现上述目的：

[0007] 本发明包括伺服调整软件层、速度环整定算法层和通信接口层，所述伺服调整软件层包括采样功能、频域辨识功能、控制参数计算功能和数据可视化功能，所述速度环整定算法层包括激励信号、频域辨识和整定公式，所述通信接口包括控制模式、数据读写和参数管理；

[0008] 所述伺服调整软件层负责界面操作逻辑，结合整定算法接口与通信接口，实现通信数据显示、整定结果显示以及整定步骤引导；

[0009] 所述速度环整定算法层提供整定算法接口，帮助软件计算控制参数；

[0010] 所述通信接口用于通信数据的处理，提供数据管理与系统控制等接口，帮助软件完成整定过程中的数据交换与数据处理。

[0011] 所述伺服调整软件层信号的采样、速度环控制参数优化以及数据可视化功能基于QT框架实现，采样功能用于下发采样参数与接收返回的数据，包括激励信号下发和采集反馈速度与阶跃响应数据；控制参数计算功能通过调用整定算法接口与通信接口，完成参数的计算与评价；数据可视化功能用于可视化通信数据，频率辨识功能中由于频率辨识算法采用Python完成，频率辨识功能由两部分组成，一部分是软件上的频率响应辨识流程控制，另外一部分是Python实现的计算程序，两部分基于TCP与共享内存混合通信的方式，实现辨

识功能。

[0012] 所述速度环整定算法层包括速度调节器、电流控制器、逆变器、交流伺服电机和整定算法，所述整定算法包括激励信号、参数辨识和整定公式，所述激励信号位于速度调节器与电流控制器之间，所述参数辨识位于速度调机器输入端，所述参数辨识输出至所述整定公式，整定供水传输至所述速度调节器，通过激励信号算法产生指令电流值，采集反馈速度，结合参数辨识算法，获取系统开环传递函数的幅频、相频数据；忽略伺服系统非线性因素，输入信号设置为，传递函数设置为，未加入噪声的输出结果为，噪声输入为，最终输出结果为，整合可得输入输出量关系为：

$$[0013] \begin{cases} z(t) = \int_0^\infty g(\lambda)u(t-\lambda)d\lambda \\ y(t) = z(t) + v(t) \end{cases} \rightarrow y(t) = v(t) + \int_0^\infty g(\lambda)u(t-\lambda)d\lambda \quad (1)$$

[0014] 将式(1)的两边乘以  $u(t-\tau)$ ，然后计算数学期望可得：

$$[0015] \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T z(t)u(t-\tau)dt = \int_0^\infty g(\lambda)d\lambda \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t-\lambda)u(t-\tau)dt \right\} + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t)u(t-\tau)dt \quad (2)$$

[0016] 根据自相关(式3)与互相关函数(式4)的定义，可化简式(2)为式(5)；

$$[0017] R_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t+\tau)dt \quad (3)$$

$$[0018] R_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t+\tau)dt \quad (4)$$

$$[0019] R_{zu}(\tau) = \int_0^\infty g(\lambda)R_u(\tau-\lambda)d\lambda + R_{vu} \quad (5)$$

[0020] 分析式(5)，考虑输入信号  $u(t)$  与噪声输入  $v(t)$  的关系，对于斜坡信号、正弦信号等激励信号，频谱范围不够宽，无法充分激励辨识系统，并且与噪声信号具有一定的相关性，为避免系统工作在非线性区，减小输入信号对系统的扰动，消除噪声输入的影响，输入信号选择白噪声，不同时刻白噪声的互相关函数值为0，因此可得输入信号与白噪声输入的互相关  $R_{vu}$  值为0；

[0021] 当输入信号为白噪声时，对(5)进行傅里叶变换，可得关系为：

$$[0022] G_{zu}(\omega) = H(\omega)G_u(\omega) \quad (6)$$

[0023]

[0024] 根据式(6)可知，伺服系统的传递函数与输入信号量的自功率谱的乘积等于输入信号量与输出信号量的互功率谱，而满足上述关系时激励信号需为白噪声，但在实际工程中，白噪声难以实现，因此输入信号使用PRBS信号。

[0025] 本发明的有益效果在于：

[0026] 本发明是一种基于频率响应的速度环控制参数自整定伺服调整平台，与现有技术相比，本发明结合工程实践，兼顾伺服系统调整过程中动态数据实时交互需求及用户操作习惯，实现一套具有速度环自整定功能的可视化操作平台。该平台基于EtherCAT主站，其传输效率高，主站与从站交换数据的时间为微秒级，因此通过EtherCAT主站设计稳定安全的通信接口，并结合基于模型的速度环控制参数整定算法，设计并实现具有速度环整定功能

的伺服调整软件,具有推广应用的价值。

## 附图说明

- [0027] 图1是本发明的速度环控制参数调整流程图;
- [0028] 图1中a:速度环控制参数手动调整流程图;b:速度环控制参数自动调整流程图;
- [0029] 图2是本发明的平台三层结构图;
- [0030] 图3是本发明的软件功能关系图;
- [0031] 图4是本发明的自整定算法结构关系图;
- [0032] 图5是本发明的通信接口关系图;
- [0033] 图6是本发明的整定算法框图;
- [0034] 图7是本发明的系统阶跃响应图;
- [0035] 图8是本发明的频率响应辨识输入输出量关系图;
- [0036] 图9是白噪声谱密度图;
- [0037] 图10是本发明的PRBS产生原理图;
- [0038] 图11是本发明的十一阶PRBS图;
- [0039] 图12是本发明的周期图法计算结果;
- [0040] 图13是本发明的welch法计算结果;
- [0041] 图14是卷绕现象消除前曲线图;
- [0042] 图15是卷绕现象消除后曲线图;
- [0043] 图16是本发明的速度环控制框图;
- [0044] 图17是本发明的速度环开环幅频特性图;
- [0045] 图18是本发明的仿真模型图;
- [0046] 图19是本发明的matlab频率响应辨识曲线图;
- [0047] 图20是本发明的频率响应辨识曲线图;
- [0048] 图21是本发明的阶跃响应测试图。

## 具体实施方式

- [0049] 下面结合附图对本发明作进一步说明:
- [0050] 在调整速度环控制参数时,根据平台是否集成整定功能分为手动与自动两种方式。手动调整流程如图1a所示,操作人员设置速度环控制参数后,通过观测伺服系统运行曲线是否满足伺服系统运行要求,不断更改,确定最终参数。
- [0051] 手动调整参数的效果与操作人员的工程经验相关,调整过程中设置的不合理参数可能增加伺服系统运行的风险,降低调整效率。而在具有整定功能的平台中,无需不断更改参数,只需连接伺服系统与调整平台,通过平台下发输入信号,采集反馈数据,计算控制参数等流程后,最后通过比较评价指标与控制参数的性能表现,验证当前结果是否最优。具有整定功能的平台使用整定算法计算较优的控制参数,提高了整定效率,其流程如图1b所示。
- [0052] 通过对分析,本文研究的伺服调整平台需要与伺服系统建立通信连接,完成电流指令地下达、反馈速度地获取、辨识系统伯德图属性、计算伺服系统的速度环控制参数以及获取伺服系统的阶跃响应曲线来评价系统性能等动作,并且伺服调整平台应能提高整定

后的伺服系统动态响应能力和抗扰动能力,具备一定的实用功能,因此具有速度环整定功能的伺服平台需求如下:

[0053] 完善的软件功能。软件应具有完整且合理的交互界面,界面的切换与更新应符合操作逻辑,在调用接口时,需要合理的规划接口调用逻辑,与整定算法流程保持一致,保证功能运行的安全性。

[0054] 速度环整定算法。速度环整定算法应结合理论与实际生产环境,自动适应多种应用情况,对于系统属性具有较好的辨识度,在此基础上设计鲁棒性较强且整定效果较好的算法。

[0055] 通信接口。结合实时性高与带宽高的通讯协议,提供不同参数的转换接口,设计多种通讯方式接口,方便与伺服系统交换数据并实时控制伺服系统。

[0056] 根据需求,本文将平台架构分为三部分,如图2所示。

[0057] 伺服调整软件提供可视化界面,负责界面操作逻辑,结合整定算法接口与通信接口,实现通信数据显示、整定结果显示以及整定步骤引导;速度环整定算法提供整定算法接口,帮助软件计算控制参数,算法接口包括激励信号生成接口、辨识算法接口以及控制参数计算接口;通信接口用于通信数据的处理,提供数据管理与系统控制等接口,帮助软件完成整定过程中的数据交换与数据处理。

[0058] 整定流程如下:操作人员首先通过软件下达采样命令,采样功能调用激励信号算法接口,实时产生输入电流指令,并通过周期电流模式接口下发指令,同时接收伺服系统运行数据并存储数据;接着下达辨识指令,通过调用辨识算法接口,生成幅频与相频数据;然后使用控制参数计算功能求出系统截止频率,调用控制参数计算算法计算控制参数,并将计算的控制参数下写伺服系统;最后在下写成功的同时触发阶跃响应命令,获取阶跃响应数据曲线,根据曲线微调控制参数值。

[0059] 伺服调整平台软件结合整定算法接口与通信接口,实现信号的采样、频率辨识、速度环控制参数计算以及数据可视化功能。

[0060] 信号的采样、速度环控制参数优化以及数据可视化功能基于QT框架实现。采样功能用于下发采样参数与接收返回的数据,包括激励信号下发和采集反馈速度与阶跃响应数据;控制参数计算功能通过调用整定算法接口与通信接口,完成参数的计算与评价;数据可视化功能用于可视化通信数据。频率辨识功能中由于频率辨识算法采用Python完成,因此频率辨识功能由两部分组成,一部分是软件上的频率响应辨识流程控制,另外一部分是Python实现的计算程序,两部分基于TCP与共享内存混合通信的方式,实现辨识功能。功能之间通过操作逻辑降低耦合性,并通过如图3的关系连接。

[0061] 结合软件功能分类与软件功能关系,软件功能执行流程分为三步:采样、频率辨识与控制参数计算,功能运行时,为方便观测软件是否运行正常,将执行信息通过文本框显示,并且在各功能执行完毕后,将计算结果使用曲线绘制,方便观察数据是否合理。

[0062] 本发明自整定算法采用基于模型的方法实现,解决了三个问题:激励信号、辨识算法以及整定公式,并且当算法求解出控制参数后,使用时域性能指标对速度环控制参数进行评价,自整定算法结构如图4所示。

[0063] 伺服系统实际工作环境复杂,干扰与不稳定因素较多,固定的周期信号无法反映伺服系统属性,本文采用伪随机二进制信号作为激励信号,使用软件方法模拟产生,并且在

给二进制信号加上幅值后,作为电流指令值输出。

[0064] 辨识算法输入指令电流与反馈速度数据,通过对输入输出量的相关性分析,辨识输出幅频、相频数据,但由于周期图法辨识精度低,辨识结果较差,因此使用welch法代替周期图法,代替后的辨识方法能良好的解决周期图法的缺点,获得较高的辨识精度。

[0065] 控制参数计算算法在求解伺服系统传递函数的基础上,通过分析开环幅频特性,并结合辨识算法计算的截至频率,设计控制参数计算公式。为验证控制参数是否合理,执行阶跃响应响应命令并绘制数据,结合时域性能指标,评价参数是否最优。

[0066] 本发明通信方案选用EtherCAT协议,根据本文需求,需要在windows上实现EtherCAT主站,并在主站上实现与伺服系统交互的接口。

[0067] Windows上建立主站一般使用开源的框架,比较常用的开源方案主要有两种:IGH主站与SOEM主站,两种主站对比如表1所示,由于IGH主站不支持windows系统,在可移植性与兼容方面略差,若将其移植至windows平台,可能造成通讯性能大打折扣,而在协议支持上,SOEM主站比IGH主站支持的协议少,但是本文只采用COE(CANopen On EtherCAT)协议。因此,从兼容性与协议两方面考虑,采用SOEM主站将更适合本文要求。

[0068] 表1 SOME与IGH对比表

| 选项<br>框架 | SOME   | IGH           |
|----------|--------|---------------|
| [0069]   | 发布公司   | RT-LAB        |
|          | 支持操作系统 | Linux、Windows |
|          | 分布式时钟  | 支持            |
|          | 支持协议   | COE、SOE       |
|          |        | COE、SOE、VOE 等 |

[0070] SOEM主站支持分布式时钟,提供周期与非周期通信两种方式,在从站管理与数据读写方面,提供比较实用的接口,但接口并不适用管理伺服系统的数据,因此需要在主站的基础接口上,根据通信流程进一步定义各种伺服系统通信接口与数据处理接口。

[0071] 为了减小通信接口与其他接口或模块的关联性,同时遵循接口简单优雅的原则,可将通信接口定义为三类:参数管理、数据读写以及运动控制模式。三类接口关系如图5所示,

[0072] 参数管理接口分为参数映射与参数读写两类,参数映射负责转换CIA402标准定义的参数与伺服系统的参数,而参数读写负责采样数据与参数的存储、读取,方便数据的统一管理;通信数据读取分为非周期读写与周期读写两种,本文根据主站提供的接口,将两种通信方式流程化、标准化,减小调用冗余;实时控制接口控制伺服系统的运动,共分为三种周期控制模式,分别是周期速度、周期扭矩以及周期位置,在三种周期模式中,除调用主站接口、参数管理接口与通信数据接口外,在控制周期内,结合PDS(Power Driver Systems)的状态切换,对控制模式的状态进行了管理。

[0073] 根据平台总体架构设计,本发明主要使用通信接口获取伺服系统的数据,伺服调整软件调用速度环整定算法计算控制参数,根据平台的总体架构设计总结关键点如下:

[0074] 伺服调整软件。设计人性化的界面与安全调用接口机制,并结合合理的软件交互

逻辑与计算逻辑设计,加强软件功能的适应性。

[0075] 整定算法的设计。该关键点需要设计激励信号、参数辨识与控制参数计算三个算法,其中激励信号算法应充分激励系统各种状态,而参数辨识算法能够准确的辨识系统属性,最后计算的控制参数能提高系统的性能。

[0076] 通讯接口的设计。基于SOEM主站框架,结合本文使用的伺服系统,需要设计特殊的存储结构管理系统参数,并将通信过程流程化,方便实时控制伺服系统。

[0077] 通过对比手动调整与自动调整速度环控制参数的流程,总结出平台的功能与需求,根据需求,设计了伺服调整软件功能、速度环自整定算法的四个关键部分以及整个通信接口的架构,最后根据总体设计,确定了平台的关键技术。

[0078] 如图6所示:本发明基于模型自整定算法原理,分析激励信号对辨识结果的影响,设计激励信号与参数辨识算法,结合开环幅频特性,设计参数整定公式,为验证整定算法的可行性,建立仿真模型进行验证。由于需要评价速度环性能,本发明介绍与分析了时域下的性能评价指标。

[0079] 速度环性能评价指标:

[0080] 在时域下评价速度环性能,需向伺服系统输入速度指令,伺服系统返回响应速度,通过观测反馈速度与指令速度曲线,结合相关指标,评判系统性能。

[0081] 常用性能指标如图7所示,不同的指标反映系统对输入指令的处理能力与系统的基本属性, $T_r$ 与 $T_p$ 反映系统对输入指令的跟踪能力,需要跟踪的时间越短,响应能力越强; $M_p$ 反映系统调节是否过量,数值越小,系统的稳定程度越高; $T_s$ 反映系统稳定能力,时间越短,系统抗干扰性越强,稳定评判标准为指令与反馈差值的2%至5%之间。

[0082] 由于时域性能指标之间互相关联,单个指标无法准确描述系统的动态性能,而同时满足多个指标的系统也难以实现,因此,在描述系统的稳定性以及快速响应能力时,需结合实际情况,选择合适的评判标准。结合评价指标特点分析,在速度环中选择时域性能评判标准时,考虑系统的响应能力与稳定能力,应加重上升时间与调节时间指标的占比。

[0083] 激励信号与参数辨识算法:

[0084] 通过激励信号算法产生指令电流值,采集反馈速度,结合参数辨识算法,获取系统开环传递函数的幅频、相频数据。如图8表示了输入数据、反馈数据以及传递函数的关系。

[0085] 忽略伺服系统非线性因素,输入信号设置为 $u(t)$ ,传递函数设置为 $g(t)$ ,未加入噪声的输出结果为 $z(t)$ ,噪声输入为 $v(t)$ ,最终输出结果为 $y(t)$ ,整合可得输入输出量关系为:

$$\begin{cases} z(t) = \int_0^\infty g(\lambda)u(t-\lambda)d\lambda \\ y(t) = z(t) + v(t) \end{cases} \rightarrow y(t) = v(t) + \int_0^\infty g(\lambda)u(t-\lambda)d\lambda \quad (1)$$

[0087] 将式1的两边乘以 $u(t-\tau)$ ,然后计算数学期望可得:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T z(t)u(t-\tau)dt = \int_0^\infty g(\lambda)d\lambda \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t-\lambda)u(t-\tau)dt \right\} + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t)u(t-\tau)dt \quad (2)$$

[0089] 根据自相关(式3)与互相关函数(式4)的定义,可化简式2为式3-5。

$$[0090] R_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t+\tau)dt \quad (3)$$

$$[0091] R_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t+\tau)dt \quad (4)$$

$$[0092] R_{zu}(\tau) = \int_0^{\infty} g(\lambda)R_u(\tau-\lambda)d\lambda + R_{vu} \quad (5)$$

[0093] 分析式5,考虑输入信号u(t)与噪声输入v(t)的关系,对于斜坡信号、正弦信号等激励信号,频谱范围不够宽,无法充分激励辨识系统,并且与噪声信号具有一定的相关性,为避免系统工作在非线性区,减小输入信号对系统的扰动,消除噪声输入的影响,输入信号选择白噪声。如图9所示,不同时刻白噪声的互相关函数值为0,因此可得输入信号与白噪声输入的互相关R<sub>vu</sub>值为0。

[0094] 当输入信号为白噪声时,对式3-5进行傅里叶变换,可得关系为:

$$[0095] G_{zu}(\omega) = H(\omega)G_u(\omega) \quad (6)$$

[0096] 根据式6可知,伺服系统的传递函数与输入信号量的自功率谱的乘积等于输入信号量与输出信号量的互功率谱,而满足上述关系时激励信号需为白噪声,但在实际工程中,白噪声难以实现,因此输入信号使用PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence) 信号。

[0097] 根据式6可知,伺服系统的传递函数与输入信号量的自功率谱的乘积等于输入信号量与输出信号量的互功率谱,而满足上述关系时激励信号需为白噪声,但在实际工程中,白噪声难以实现,因此输入信号使用PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence) 信号。

[0098] 激励信号:

[0099] PRBS是一组随机二进制序列,其k阶信号的周期长度为2<sup>k</sup>-1,实现原理如图10所示。

[0100] PRBS由移位寄存器与随机数寄存器构成。移位寄存器用于保存信号状态,而随机数寄存器控制移位寄存器变化方式,如表2展示,对于不同的阶数,随机数寄存器初始化值不同。

[0101] 表2随机数种子

| 阶数 \ 种子值 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 9        | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |   |    |
| 10       | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |    |
| 11       | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  |

[0103] PRBS的产生首先是对随机数种子与移位寄存器的值做和运算,然后对计算结果求和,最后更改移位寄存器的值,即高位值覆盖低一位的值,最高位的值使用求和的结果覆盖,移位完成后输出最高位的值作为当前时刻的信号。如图11为十一阶PRBS。

[0104] 为持续且充分的激励伺服系统各种模态,应选取高阶数的PRBS与较大的输出幅值,但过大的阶数会增加计算时间,且输出幅值过大将增加系统扰动,因此综合计算速度与系统的抗干扰能力,本发明选取11阶的PRBS信号,并且设置信号幅值为1,当输出结果为0时,指令电流为-1,否则为1。

[0105] 基于Welch法的参数辨识:

[0106] 根据式6可知,传递函数的求解需要计算输入输出信号的功率谱,因此,只需要对

输入量的自相关函数以及输入输出量的互相关函数求解功率谱,即可求解传递函数的伯德图数据。

[0107] 常用的功率谱求法采用的是周期图法,通过等分分割采样数据,然后求出每份采样数据的功率谱,最后求取平均值。周期图法虽然计算简单,但傅里叶变换域是无限长的,周期图法限制了时域范围,导致频率精度低,无法有效的反应信号与频率的关系。为改进周期图法的辨识精度不高的缺点,使用welch法求解功率谱,welch法的特点主要有两个:第一个是分割数据时,相邻的两份数据重叠一部分,增加采样数据的利用率,提高计算精度;第二个是对采样数据加上式7的汉明窗( $N$ 为窗函数的数据个数),通过加窗,有效的过滤扰动数据,使数据更加平滑。welch法通过两个改进,有效的提高了估计方差,一定程度上抑制了数据的抖动。

$$[0108] \quad \omega(n) = 0.5 * (1 - \cos(\frac{2\pi n}{N-1})) \quad (7)$$

[0109] 输入信号 $u(t) = \sin(t+1) + \cos(2t+5) + \text{rand}()$ , $\text{rand}()$ 为随机信号,模拟噪声,采样率设置为1kHz,周期图法与welch法计算结果分别如图12和13所示,两种方法虽能有效的计算功率谱数据,但welch的计算结果更加精确,数据震荡更小。

[0110] 通过welch法可以获取精度更高的辨识数据,但是在计算相频数据时,由于相位滞后的缘故,当相位滞后超过180度时,会产生卷绕现象。卷绕现象是相频数据为-180度时,数据会发生跳变,转变为+180度,如图14所示。

[0111] 为纠正卷绕现象,对相频数据进行纠正,当相邻的两个角度差值的绝对值不超过360度时,纠正相位角正负值,消除卷绕现象,纠正后如图15所示。

[0112] 基于开环幅频特性的控制参数计算:

[0113] 通过参数辨识算法获取系统的幅频相频数据,结合开环幅频特性,设计参数计算公式,求解较优控制参数值。

[0114] 根据图6所示,电流环作为控制系统内环,能加快系统对输入指令的反应,其闭环传递函数为 $\frac{1}{2T_c s + 1}$ ( $T_c$ 是电流环时间常数)。为进一步提高系统速度的动态跟踪性能,速度环控制器使用PI方法,得其公式:

$$[0115] \quad G_{PI} = K_{sp} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (K_{sp} \text{为比例增益}, T_i \text{为控制器积分时间常数}) \quad (8)$$

[0116] 实际应用中的电机运转过程会存在负载,需要引入简化的负载模型,模型函数为 $\frac{1}{J_s + B}$ 。采样反馈速度时,由于干扰信号的存在,导致采样数据失真,为弥补扰动,加入滤波器、速度检测反馈系数以及速度检测延时系数,同理,输入指令也需要滤波减少干扰,增加传入数据的真实性。根据分析得图16的速度环控制框图。

[0117] 结合图14,忽略摩擦系数与检测延时系数,可得开环传递函数为:

$$[0118] \quad G_s(s) = \frac{K_{sp} K_t K_{sf} (T_{sr} s + 1)}{J T_{si} s^2 (2T_c s + 1)(T_{sf} s + 1)} \quad (9)$$

[0119] 分析速度环开环幅频特性图17,当 $\omega_c$ 过大时,系统的响应能力较强,但系统的抗

干扰性减弱,而过小的 $\omega_c$ 相反,减弱响应能力,增强抗干扰能力,同时考虑系统的响应与抗干扰能力,通常 $\omega_c$ 在 $\frac{1}{T_i}$ 与 $\frac{1}{T_c}$ 之间取值,而在实际工程中,根据幅频特性峰值最小准则,可得式10确定速度环积分系数与截至频率关系。

$$[0120] \quad \omega_c T_i = 5 \rightarrow T_i = \frac{5}{\omega_c} \quad (10)$$

[0121] 考虑在 $\omega_c$ 附近,由于反馈常数滤波器常数 $T_{sf}$ 一般较小,可化简开环传递函数为式11,并根据式12,求得速度环比例系数公式13。

$$[0122] \quad G_s(s) = \frac{K_{sp} K_t K_{sf}}{J_s} \quad (11)$$

$$[0123] \quad |G_s(j\omega)| = 1 \quad (12)$$

$$[0124] \quad K_{sp} = \frac{J\omega_c}{K_t K_{sf}} \quad (13)$$

[0125] 根据速度环比例系数与积分系数计算公式,使用参数辨识算法辨识出系统的截止频率,即可求出控制参数。

[0126] 速度环参数自整定仿真验证

[0127] 在设计频率响应辨识算法与控制参数计算算法时,由于部分关键值根据经验取值并忽略了部分参数,因此使用Simulink搭建仿真实验平台验证算法,仿真使用的电机的参数如表3所示。

[0128] 表3仿真电机参数

| 参数名称   | 参数               |
|--------|------------------|
| 额定电流   | 6.5A             |
| 额定转速   | 2000rpm          |
| 额定转矩   | 6.4N.m           |
| 额定转动惯量 | 1.06*10^-2kg*m^2 |
| 力矩系数   | 0.6962N*m/A      |

[0130] 建立的仿真模型如图18所示。

[0131] 获取仿真模型的指令电流与反馈速度,在matlab上做频率响应辨识,生成幅频、相频图如图19所示。

[0132] 导出仿真模型的指令电流与反馈速度,使用本文实现的辨识算法计算,辨识结果如图20所示。

[0133] 观察matlab与本文实现的频率响应辨识,两者在低频上数据基本一致,随着频率增大,本文辨识出来的结果逐渐震荡,但总体趋势不变,需要对本文辨识的结果做平滑处理。

[0134] 取速度检测反馈系数 $K_{sf}=0.6962$ ,从幅频图中获取带宽值为 $\omega_c=3.981 \times 10^3$ rad/s,根据自整定公式计算参数为:

$$[0135] \quad \begin{cases} T_i = 5 / \omega_c = \frac{5}{3981} \\ K_{sp} = \frac{J\omega_c}{K_t K_{sf}} = \frac{1.06 \times 10^{-2} \times 3.981 \times 10^3}{0.6962 \times 1} = 60.7 \end{cases} \quad (15)$$

[0136] 将公式15计算出来的参数带入仿真系统中,测试系统的阶跃响应曲线,得到图21的结果。

[0137] 分析图21的阶跃响应曲线,阶跃指令发出后,系统能迅速的达到指令速度,在超出指令速度后,反馈速度无震荡的趋于指令速度,验证了算法的可行性。

[0138] 本发明基于时域性能评价指标,结合频率响应辨识输入输出量关系图,通过对输入信号特点的分析,提出使用伪随机二进制序列作为信号输入,并根据输入信号的特点,提出使用welch法的参数辨识方法辨识输入输出量的功率谱,接着根据速度环控制框图,结合开环幅频特性曲线分析,设计速度环控制参数整定公式,最后在matlab上建立仿真模型,验证整定算法的有效性。

[0139] 以上显示和描述了本发明的基本原理和主要特征及本发明的优点。本行业的技术人员应该了解,本发明不受上述实施例的限制,上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理,在不脱离本发明精神和范围的前提下,本发明还会有各种变化和改进,这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

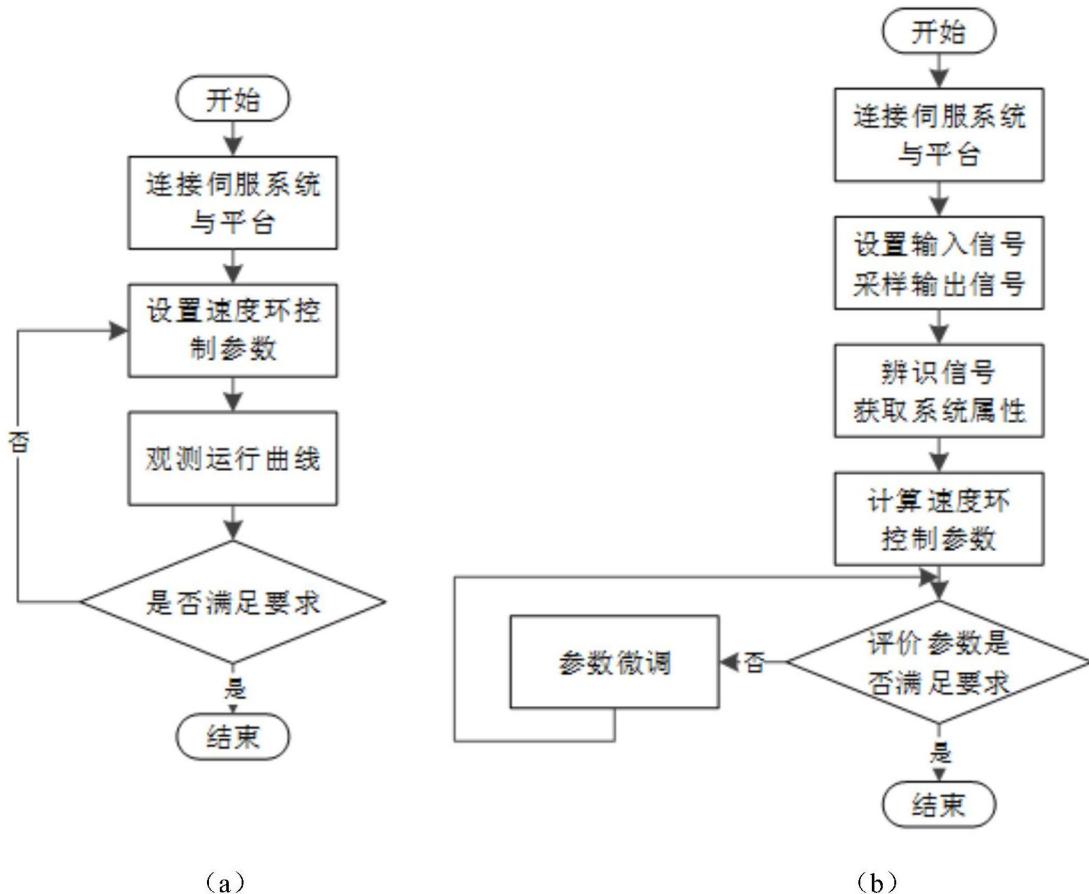


图1

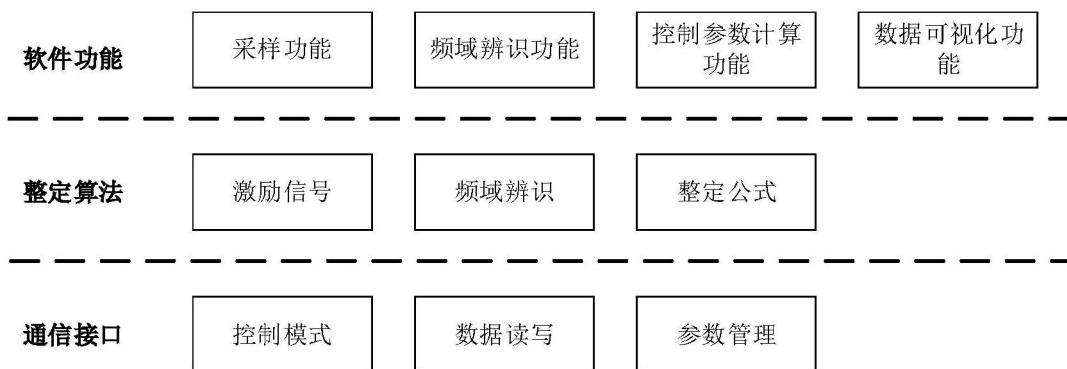


图2

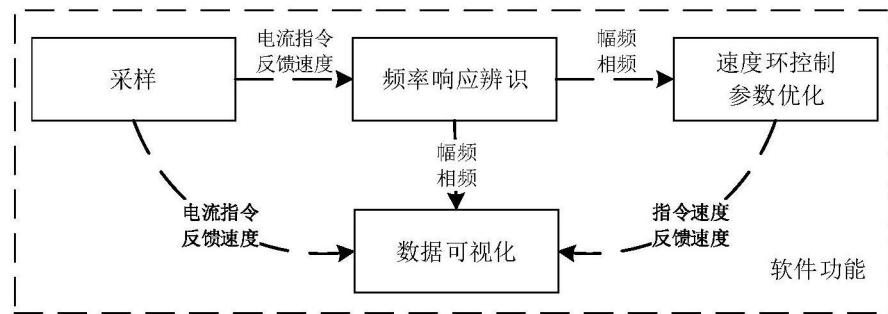


图3

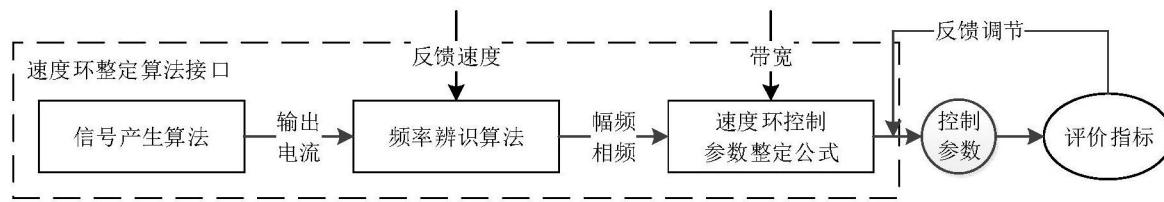


图4

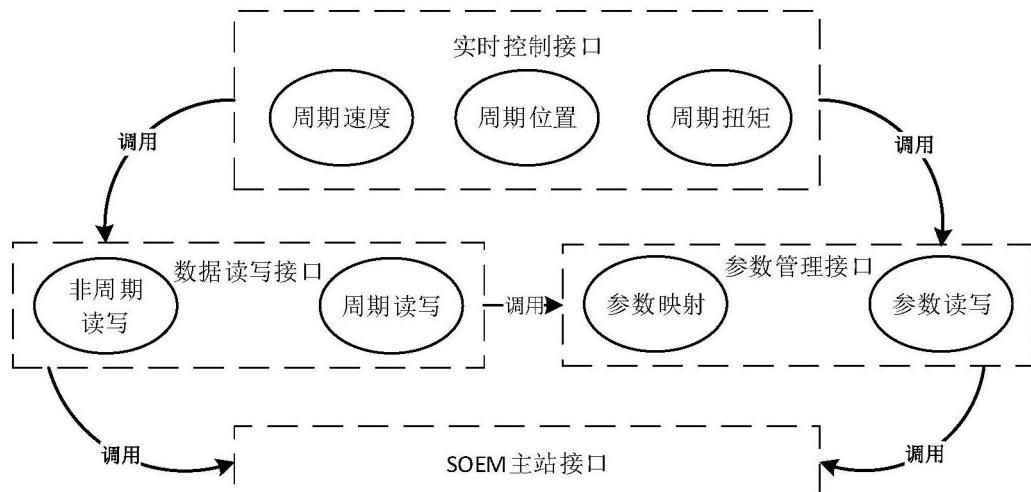


图5

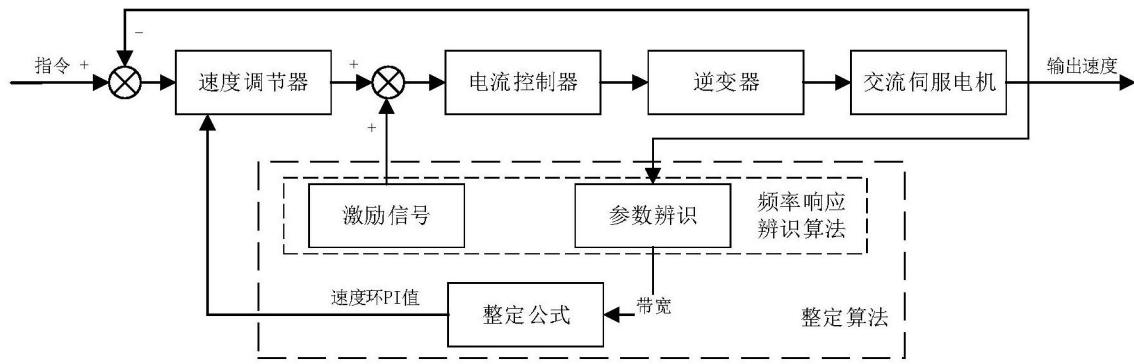


图6

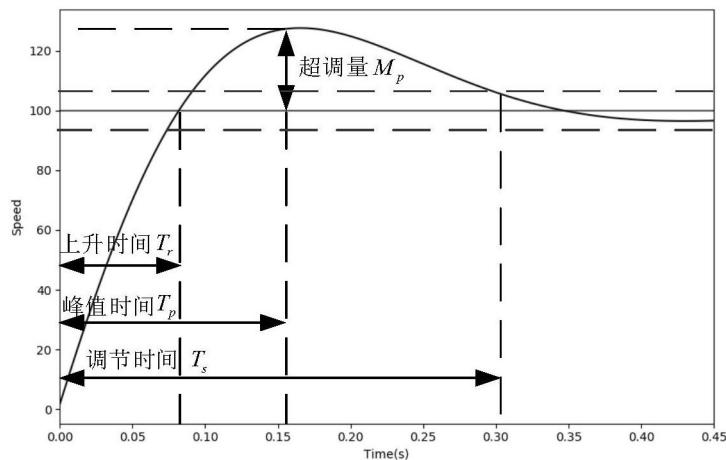


图7

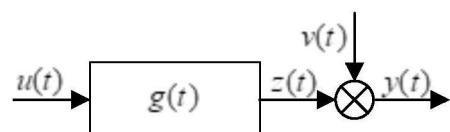


图8

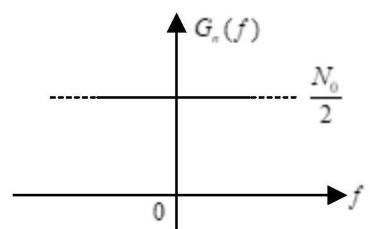


图9

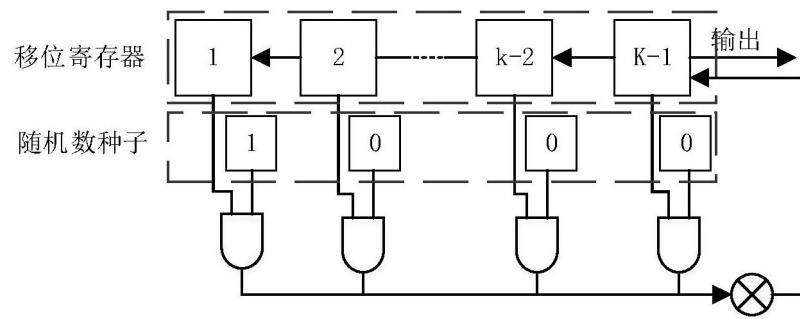


图10

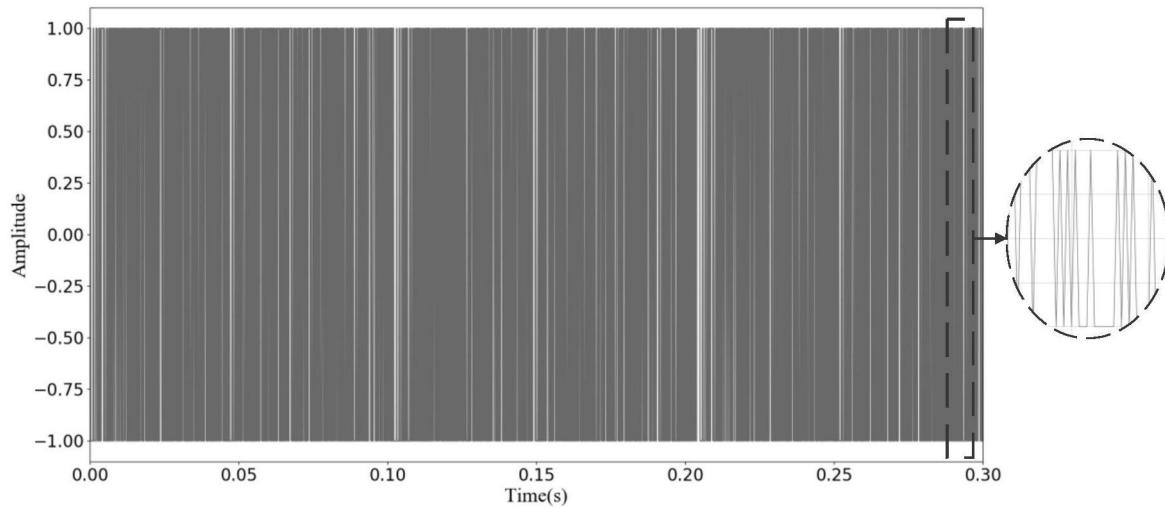


图11

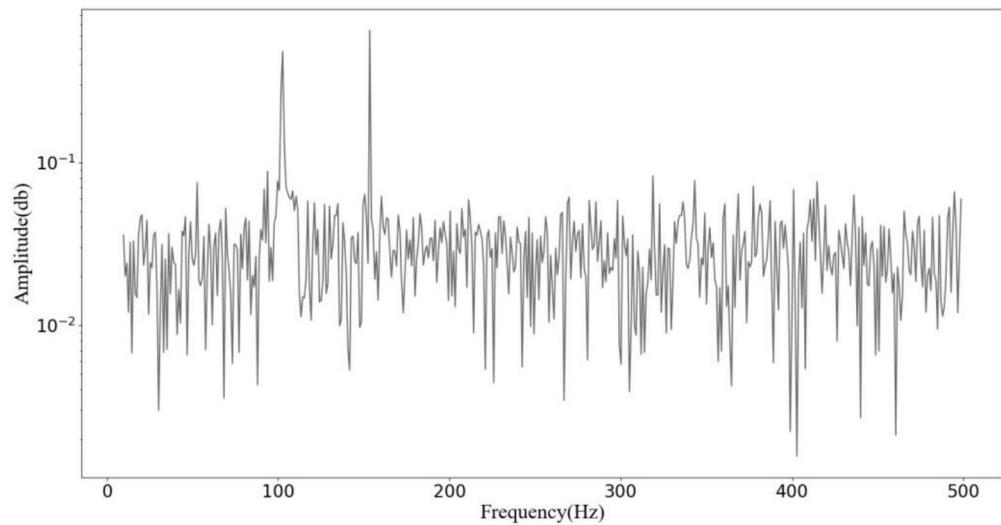


图12

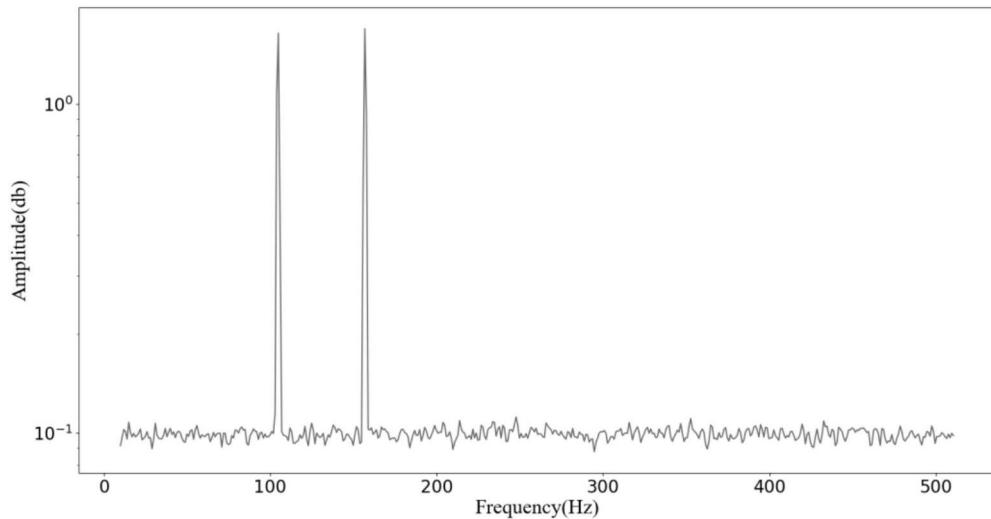


图13

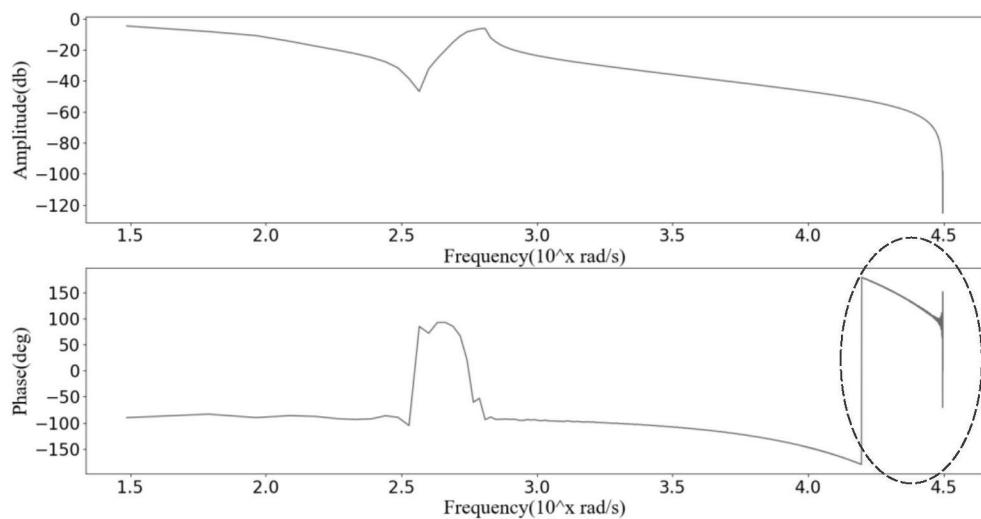


图14

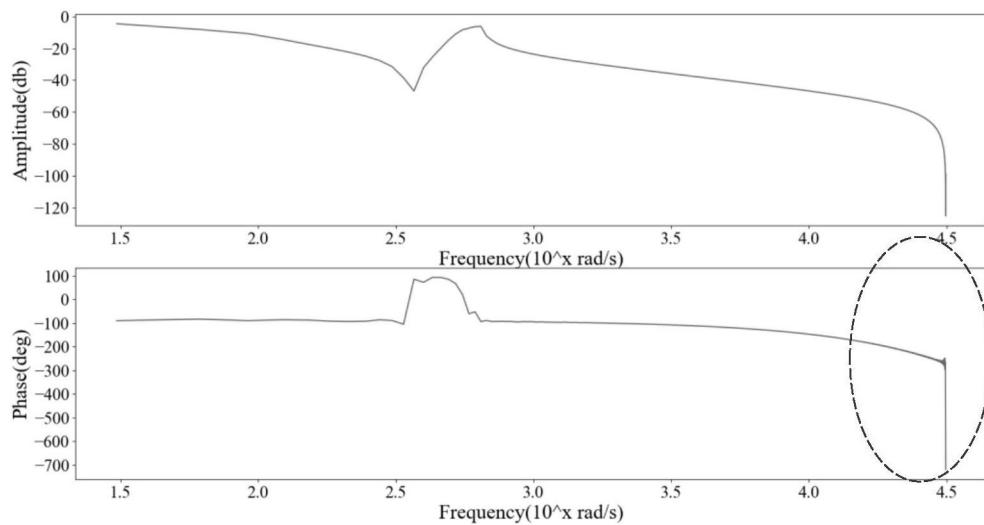


图15

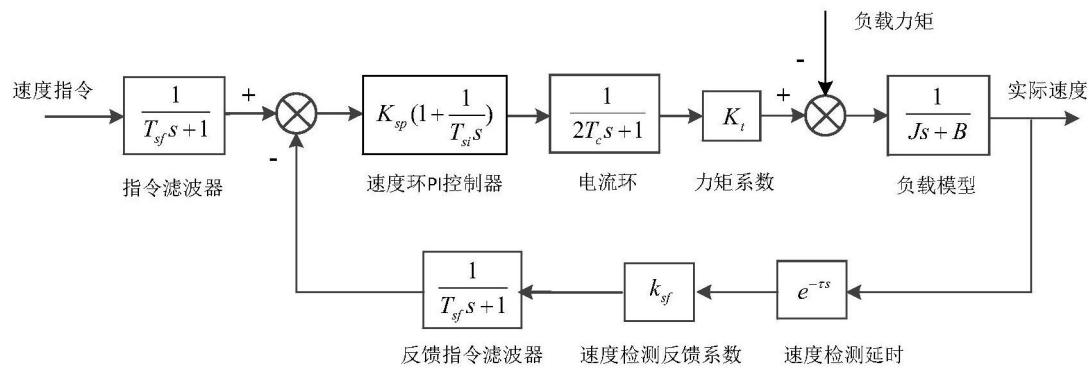


图16

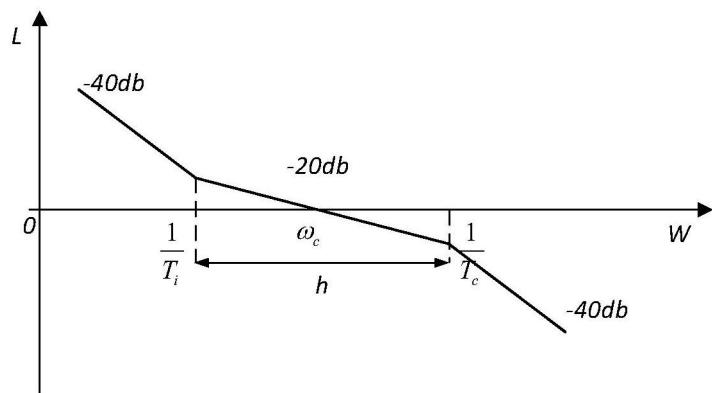


图17

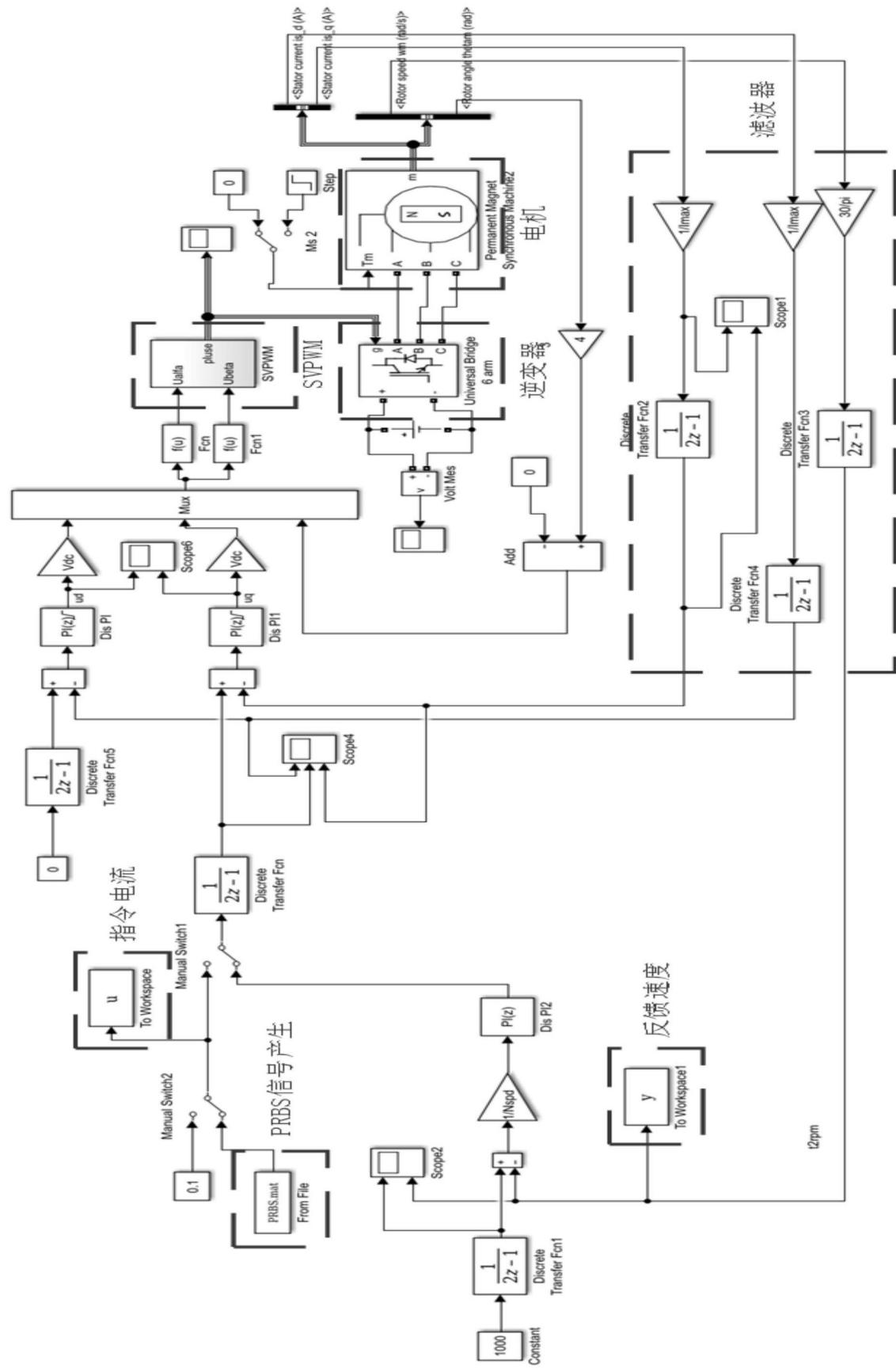


图18

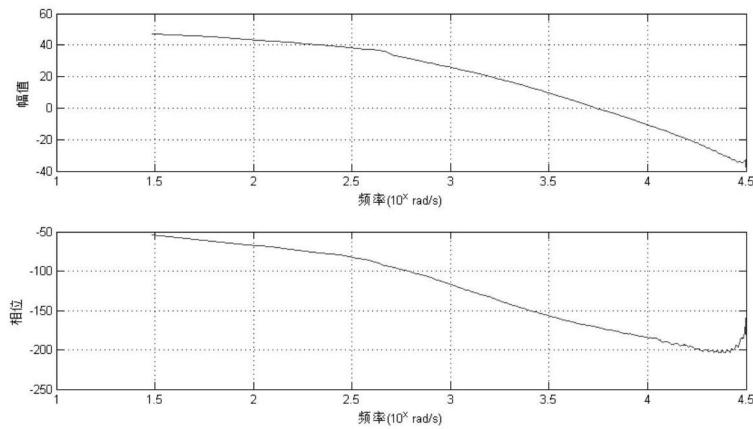


图19

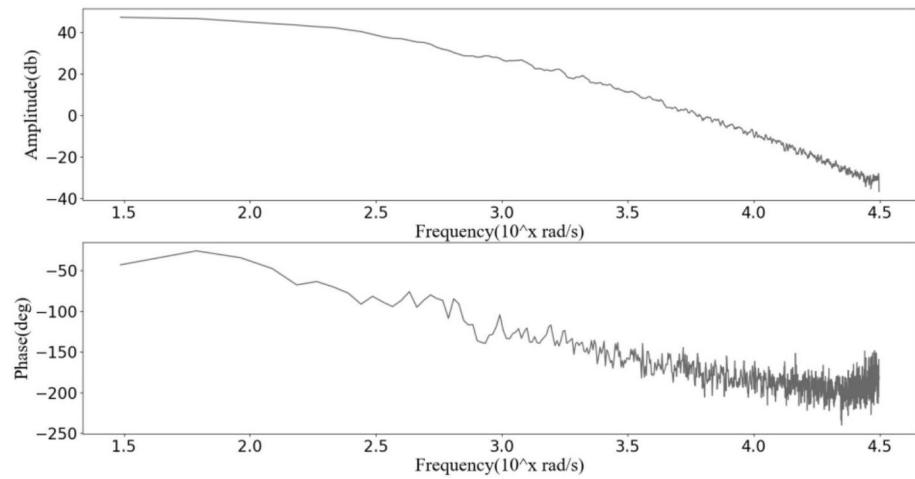


图20

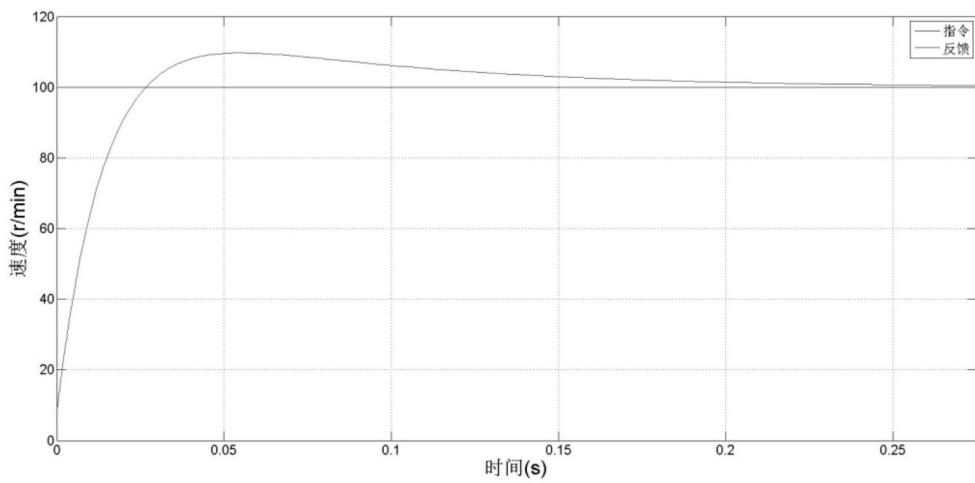


图21