

基于 PID 的直流电机调速系统设计与仿真

黄道敏, 张雪, 彭军, 曾思悦, 张娜
(空军预警学院, 湖北武汉 430019)

摘要: 利用直流电机的简化结构和等效电路, 推导系统的微分方程和传递函数, 在 Matlab/Simulink 环境下构建直流电机系统的仿真框图, 并进行仿真和分析。针对仿真结果提出了优化系统性能的控制器的设计方案。利用 Simulink 设计工具, 加入 PID 控制模块, 通过参数整定, 设计出符合指标要求的直流电机调速系统控制器。

关键词: Matlab/Simulink; 直流电机; PID; 系统仿真

中图分类号: TM302 文献标识码: A 文章编号: 1672-5387(2025)01-0012-03
DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2025.01.003

0 引言

直流电机具有良好的启动、制动性能, 适宜于在大范围内平滑调速^[1]。通过设计优化其调速性能, 直流电动机被广泛应用于调速要求较高的场合。

Simulink 依托于 Matlab 的框图化设计环境, 能够方便直观地实现对系统的建模、动态仿真及分析^[2]。其框图模型描述简单直观, 用户无需编写代码, 只需通过图形界面即可构建系统模型, 既适用于线性系统, 也适用于非线性系统, 被广泛用于控制系统、通信系统、数字信号处理及系统辨识等领域的建模与仿真。

PID 控制器模块是其中的一个重要组件, 结合 PID Tuner 工具可以实现参数自整, 因此被广泛用于设计和调优控制系统。用户也可以通过简单的操作来设置 PID 参数, 并结合 Simulink 的仿真功能, 实时观察系统的响应^[3]。本文在直流电机数学模型及 Simulink 仿真框图基础上, 加入 PID 控制模块, 通过 PID 参数自整定达到系统设计指标。

1 电机建模

系统数学模型用于描述系统运动中各个变量之间的关系, 通过数学表达式展现系统的动态特性, 是系统分析与设计的重要依据^[4]。经典理论常用的数学模型有微(差)分方程、传递函数。结构图、信号流程图是数学模型的图形表现形式。下面以解析法求

解直流电机系统的传递函数。

在控制系统中广泛采用直流伺服电动机作为执行机构, 控制被控对象的机械运动。对标准直流电动机, 为力求所建模型简便, 采取适当假设和简化, 得到其等效电路如图 1 所示。

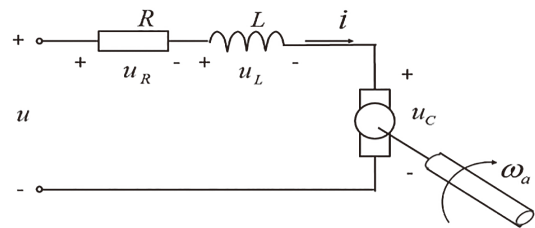


图 1 直流电动机等效电路

系统输出量为负载角速度 ω_a , 输入量为电动机的电枢电压 u , 希望求出 ω_a 与 u 之间的传递函数。设系统在零初始条件下, 环境干扰为稳定状态。可列出描述系统的微分方程如下

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{k_v}{L}\omega_a + \frac{u}{L} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_a}{dt} = \frac{k_t}{J}i - \frac{B}{J}\omega_a - \frac{T_L}{J} \quad (2)$$

为简化求解, 对(1)、(2)两个微分方程进行拉氏变换, 转化为如下的代数方程

$$I(s) = \frac{-k_v\omega_a(s) + U(s)}{L + R} \quad (3)$$

收稿日期: 2024-07-24

作者简介: 黄道敏(1971-), 女, 副教授, 从事电路与系统的教学与科研工作。

$$\omega_a(s) = \frac{k_t I(s) - T_L(s)}{Js + B} \quad (4)$$

由(3)、(4)方程得出直流电动机的模块框图如图 2 所示。假设电动机拖动的负载不变,仅考虑其转动角速度 ω_a ,可得图 3 所示的系统简化框图。

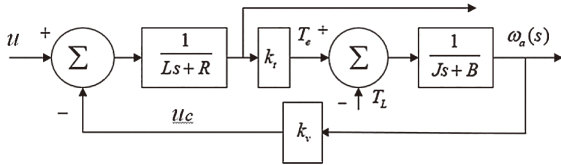


图 2 直流电机的模块框图

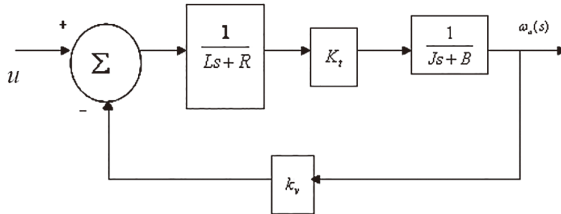


图 3 系统简化框图

由此可以进一步得到电机的传递函数

$$G(s) = \frac{\omega_a(s)}{U(s)} = \frac{\frac{k_t}{LJ}}{s^2 + (\frac{RJ+LB}{LJ})s + \frac{RB+k_t k_v}{LJ}} \quad (5)$$

2 系统时域仿真分析

在控制系统仿真研究中,常见的方法是研究系统在特定信号驱动下的时间响应。下面将通过在时域中的仿真,以单位阶跃响应的超调量、稳态误差、调整(上升)时间、幅值裕度等指标来评价控制系统的性能^[5]。这样可使对系统性能的分析图形化,又可以对物理概念的理解更直观清晰。

小型电动机在工商业中应用广泛,例如:数控机床和机器人中的执行机构、各种家用电器中的电动机等。其通常参数范围如下:

电阻 R : 0.1~2 Ω ;

电感 L : 0.1~50 mH;

反电动势常数 k_b : 0.01 ~1 V/(rad/s);

转矩常数 k_t : 0.01~1 N·m/A;

转动惯量 J : 0.001~0.01 kg·m²;

摩擦系数 B : 0.001~0.1 N·m/(rad/s)。

在以上的参数范围内,电机参数选择如下:

$R=2 \Omega$, $L=0.05 \text{ H}$, $k_b=0.1 \text{ V/(rad/s)}$, $k_t=0.02 \text{ N·m/A}$, $J=0.01 \text{ kg·m}^2$, $B=0.05 \text{ N·m/(rad/s)}$ 。

根据上文所得到的系统简化框(图 3)建立

Simulink 下动态结构仿真模型,并根据电机参数设置各模块中的参数(图 4),进行仿真,系统单位阶跃响应曲线如图 5 所示。

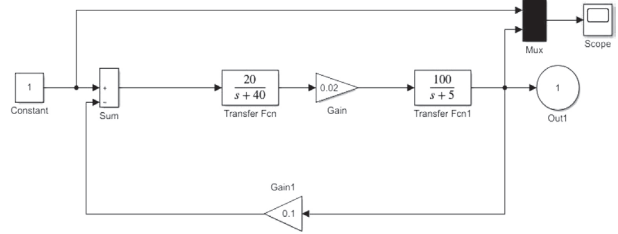


图 4 直流电动机的 Simulink 仿真模型

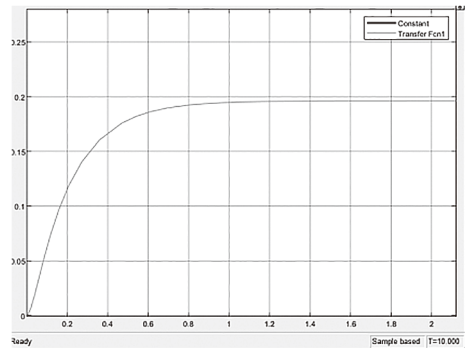


图 5 系统的单位阶跃响应曲线

通过分析上述单位阶跃响应仿真曲线,可以发现原系统不仅闭环阶跃响应幅值小而且动态响应时间也比较长,系统响应较慢。

3 PID 控制器设计

要提高系统的阶跃响应幅值和响应速度,就要对系统进行优化改善,设计调速系统的控制器。通过添加 PID 控制器模块,适当调整 PID 参数,实现对系统响应的调整,提高系统稳定性和响应速度,使系统达到相应的性能指标。

设系统的设计指标要求如下:

- (1) 稳态误差 $c_{ss} < 5\%$;
- (2) 调整(上升)时间 $t_r < 0.5 \text{ s}$;
- (3) 超调量 $M_p < 10\%$;
- (4) 幅值裕度 $G.M > 20 \text{ dB}$;
- (5) 相角裕度 $P.M > 45^\circ$ 。

将前面选定的小型电机参数代入(5)式,可求得电机被控对象的传递函数如下

$$G(s) = \frac{40}{s^2 + 45s + 204} \quad (6)$$

在 Simulink 仿真模型基础上,加入 PID 控制器模块和 CheckStep Response Characteristics 模

块,得到如图 6 所示的仿真模型。打开 Check Step Response Characteristics 模块,设置系统指标参数,并应用参数。

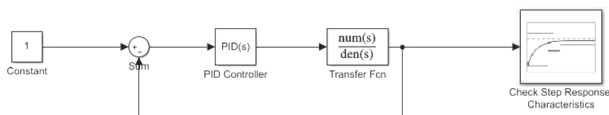


图 6 加入新模块后的仿真模型

在 PID 设置界面,将 PID 参数初始化,应用参数。

参数全部设置完成后,进行系统的 PID 参数自整定,点击上面界面中的“Tune”,出现系统的初始响应曲线(虚线)和优化后的响应曲线(实线)及具体性能参数,如图 7、图 8 所示。

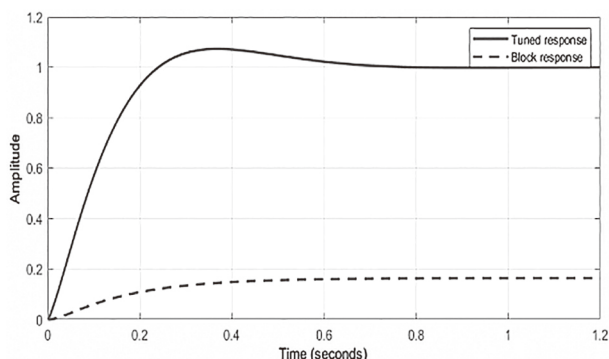


图 7 系统阶跃响应曲线

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	8.329	1
I	66.615	0
D	0.10129	0
N	1027.3187	100
Performance and Robustness		
Rise time	0.168 seconds	0.356 seconds
Settling time	0.609 seconds	0.649 seconds
Overshoot	7.25 %	0 %
Peak	1.07	0.164
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	69 deg @ 8.99 rad/s	Inf deg @ NaN rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

图 8 具体性能参数

系统加入 PID 控制器后,通过 PID 参数的调节,实现了系统响应的高增益,使幅值大幅增加,系统的超调量、稳态误差等满足了指标要求,但是系统的幅值裕度相对较大,虽然充足的幅值裕度对系统的响应速度和响应幅值有显著的改善,但也在一定程度上导致系统出现过冲,甚至产生振荡现象,降低系统的动态稳定性。为了使系统的稳定性和动态性能得到兼顾,使用 PID Tuner 的滑块调整响应时间和瞬态行为,最终使幅度和相位裕度达到一个合理的值,如图 9、图 10 所示。

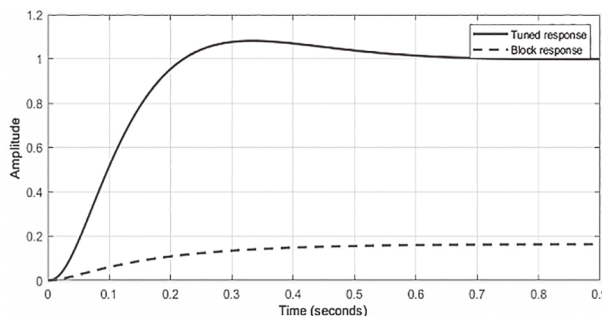


图 9 微调后的系统响应曲线

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	7.6135	1
I	61.4196	0
D	-0.062452	0
N	94.2949	100
Performance and Robustness		
Rise time	0.144 seconds	0.356 seconds
Settling time	0.571 seconds	0.649 seconds
Overshoot	8.12 %	0 %
Peak	1.08	0.164
Gain margin	26.6 dB @ 70.1 rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	62.6 deg @ 8.99 rad/s	Inf deg @ NaN rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

图 10 微调后的具体性能参数

经过微调,系统的幅值及相位裕度都在一个合理的范围内,相比于微调之前在响应速度更快,稳定性、鲁棒性更加均衡。

4 结语

PID 控制器设计满足了系统的各项性能指标。虽然 PID 控制器模块可以比较简单快速地完成对控制器的设计,但是 PID 控制器一定程度上会使系统响应产生振荡,导致系统在启动阶段不够稳定。而且 PID 控制器的性能发挥高度依赖于 PID 参数的调谐,一旦系统中有干扰进入,其恢复稳定状态的时间会相对较长。因此, PID 控制器更适用于响应需求较快的系统,对响应速度和稳定性要求更高的系统,则需要设计更为复杂的控制器。

参考文献:

- [1] 许娅,王志勇,马爱芳,等. 电机与拖动 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [2] 朱婧,冯国胜,李宏博,等. 基于 Simulink 的无刷直流电机调速系统仿真研究 [J]. 电工技术,2022 (23):16-18,23.
- [3] 李晓龙,宛剑业. 直流电机建模与 PID 控制器参数优化 [J]. 汽车实用技术,2016 (1):105-107.
- [4] 雷军委,王玲玲,梁勇,等. 经典控制原理与解析 [M]. 北京:电子工业出版社,2021.
- [5] 王晨丰. 基于 Matlab SISO 工具箱的串联超前校正设计 [J]. 集成电路应用,2021,38 (6):46-47.