

电机调速鲁棒控制系统优化设计方法

潘湘高

(湖南文学院 电气工程系, 湖南 常德 415003)

摘要: 研究了基于 Matlab 的电机调速鲁棒控制系统优化设计方法。以双闭环调速系统设计为例, 介绍了采用 Matlab/Simulink 可视化仿真环境对电机调速系统进行鲁棒性分析和优化设计的方法和步骤, 并给出了优化设计前后的对比波形。仿真结果波形表明, 用该方法优化设计的系统具有极好的动、静态特性和良好的鲁棒控制特性。

关键词: 非线性系统; 优化设计; 鲁棒设计; 建模; 仿真

中图分类号: TP 391.9; TM 743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)07-0078-04

0 引言

电机调速系统的分析和设计首先需要建立系统的数学模型, 需要电机的参数。文献[1]研究了基于小波变换和 Prony 算法的电机参数辨识方法, 文献[2]研究了最小二乘法电机参数辨识, 但这些都只能求得某一特定时间和环境条件下的参数。电机实际参数会随环境条件的变化而变化, 如绕组电阻有正的温度系数, 文献[3]对电机的动态参数采用基于 ELMAN 神经网络进行在线辨识。调速系统中的控制器(调节器)往往需要进行限幅, 故严格而言, 一个电机调速系统是非线性时变系统。然而, 非线性时变系统的分析和设计很困难, 故常常近似成线性时不变系统。近似成线性系统只对系统在平衡工作点附近小范围变化的动态过程分析有效, 对大范围变化是无效的。近似成时不变系统只有系统参数不变时(设计时用的参数)系统才有好的性能, 当实际参数发生变化时, 系统的性能就会受到严重影响。所以, 在高性能要求的应用场合需要进行鲁棒性设计, 解决控制系统的鲁棒性问题。文献[4]采用基于参数辨识对电机自适应控制, 文献[5]研究了基于神经网络的电机鲁棒控制。但这些复杂的算法势必给系统的实际设计和实现造成很大困难。本文研究了采用 Matlab/Simulink 可视化仿真环境的调速系统鲁棒性设计方法, 利用其非线性优化设计工具对系统进行分析、优化设计, 解决了鲁棒性控制问题。该设计方法不但简单、直观、方便、快捷, 而且非常准确、有效。下面以广泛应用的双闭环(串级)控制系统的分析和设计为例讨论这一方法。

1 转速、电流双闭环调速系统结构及简介

转速、电流双闭环调速系统的构成原理方框图如图 1 所示。

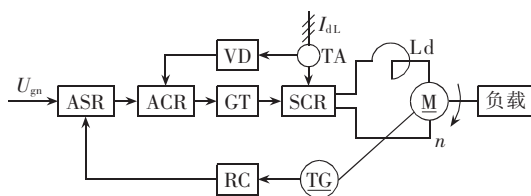


图 1 转速、电流双闭环调速系统的构成原理方框图

Fig.1 The principle diagram of the speed-current dual-closed-loop speed regulation system

系统主要由转速调节器(ASR)、电流调节器(ACR)、可控整流装置(SCR)、直流电动机 M、平波电抗器 L_d 、测速发电机 TG、电流互感器 TA 及检测转换装置 VD 组成。ACR、GT(SCR 触发装置)、SCR 及 TA、VD 组成电流反馈环——内环(以下简称电流环或 I 环), 由 ASR、M、TG 和内环再组成转速反馈环——外环(简称转速环或 n 环)。I 环的 ACR 采用带输出电压限幅(如图 2 所示)的比例-积分(PID)调节器, n 环的 ASR 采用带输出电压限幅的比例-积分-微分(PID)调节器或采用 PI 调节器(必要时再引入转速微分负反馈以减少或消除超调^[6])。系统动态结构图如图 3 所示。

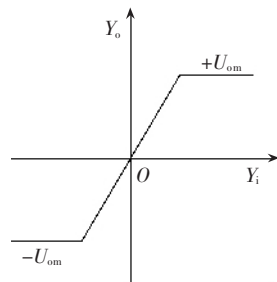


图 2 饱和或限幅特性

Fig.2 The saturation character

2 系统动态结构图和仿真模型的建立

Matlab/Simulink 非线性模块子库有比例限制(Rate Limiter)、限幅(Saturation)、死区(Dead Zone)、继电(Relay)、库仑和粘滞摩擦(Coulomb & Visous Friction)等模块。利用这些基本模块进行适当的串联、并联或混联的组合可得到更多更复杂的非线性特性, 并可由 Matlab 封装成子模块增添到 Simulink 模块库中供以后调用。有了这些非线性模块, 建立非线性系统的仿真模型就变得很容易了。

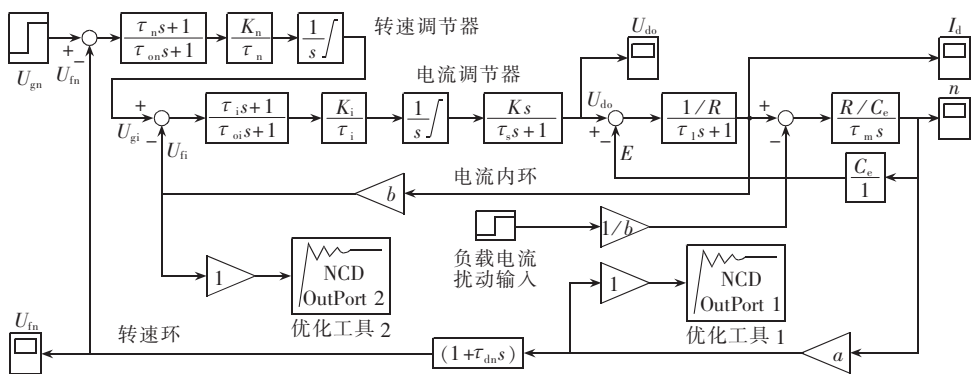


图 3 系统结构图和仿真模型
Fig.3 System structure and simulative model

利用 Matlab/Simulink, 可以很方便地根据系统的动态结构图建立动态仿真模型^[7-10], 建好后以一文件名存盘。这样建立的仿真模型如图 3 所示, 它们和系统的动态结构图几乎没有两样, 因此十分直观, 完全可以代替系统的动态结构图。而且可以十分方便地改变系统的各个参数并进行仿真, 根据仿真结果波形, 分析参数变化对系统性能的影响, 从而选取合理的控制参数。更为奇妙的是还可以用优化设计工具箱优化某些控制参数从而得到优化设计结果。在进行参数优化时, 还可以同时设定多个参数作为不确定性变量从而使优化的结果能保证系统对不确定参数的变化具有良好的鲁棒性。

3 系统仿真分析与优化设计及鲁棒性设计

两个调节器在系统中起着极为重要的作用^[6]。当系统的主回路结构及参数确定后, 系统的设计或整定主要是要合理地选择两个调节器的比例放大倍数(K_i, K_n)和积分时间常数(τ_i, τ_n)及转速微分负反馈时间常数 τ_{dn} , 再就是确定两个调节器的输出电压限幅值 U_{gim}, U_{ctm} 和转速反馈系数 a 、电流反馈系数 b 。假设 $U_{gnm}=10\text{ V}$, U_{ctm}, a, b 由下面 3 式确定:

$$a = U_{gnm} / n_{nom}, b = U_{gim} / (\lambda I_{nom}), U_{ctm} = 1.2 U_{nom} / K_s$$

式中 U_{gnm} 为最大转速给定输入电压; U_{nom}, I_{nom} 分别为电动机的额定电压和额定电流; λ 为过载系数。

两个调节器的参数由工程设计法^[6]确定其初值, 再用 Matlab/Simulink 仿真分析设计确定, 还可以用其非线性系统优化设计工具箱进行优化设计, 直到得到使系统具有良好的动、静态特性和良好鲁棒性的结果为止。

3.1 设定系统各参数变量及初值

为建立的仿真模型建立一个 M 文件程序, 设定系统各个参数变量及初值。按一定的设计方法(公式)计算出某此参数值作为优化设计的初值。运行该程序在 Matlab 工作空间建立仿真模型各参数变量及初值。

3.2 仿真运行

打开保存好的仿真模型, 并设定好仿真参数及选项, 主要是仿真停止时间及仿真算法, 其他一般可用默认值, 用鼠标左键双击各输出显示模块打开输出波形显示窗。开始仿真运行(单击模型窗上方快捷命令按钮黑三角形)。

可以同时打开参数设定计算 M 文件程序窗口和命令窗口, 这样可方便地通过赋值命令调整个别参数值或通过 M 文件调整参数或设计计算公式, 注意 M 文件调整修改后一定要执行保存和运行命令。反复进行修改, 仿真, 分析结果波形, 这样就可以方便地分析各个参数变化对系统性能的影响, 直到最后得到满意的结果为止。也可以确定原始参数(修改 M 文件并执行)得到较好的初值后, 就用优化工具进行优化设计和鲁棒性设计。

3.3 优化设计和鲁棒性设计

先优化电流内环 ACR 的 K_i 和 τ_i 2 个参数, 再优化外环 ASR 的 K_n, τ_n 和微分负反馈时间常数 τ_{dn} 3 个参数。

3.3.1 电流环的优化设计

先断开图 3 所示仿真模型 U_{gi} 和 U_{gn} 连线, 将 U_{gi} 直接接阶跃模块的输出信号, 断开反势 E 的连线, 然后再双击图 3 中的“优化工具 2”打开优化设计窗口。

设定待优化变量 K_i, τ_i 及其下限值、上限值, 调整间距、变量允差和约束允差, 设定不确定性参数变量 τ_m, τ_l 及其变化范围以使系统在这些参数变化时具有鲁棒性。这里选取系统的机电时间常数 τ_m 和主回路的电磁时间常数 τ_l 为不确定性变量的原因是, 当电机所带负载变化时 τ_m 会变, 当温度变化时, 主回路的电阻 R 、电感 L 就会变化而引起 τ_l 的变化, 这是符合实际情况的。最后开始仿真优化, 优化过程中可方便地用鼠标拖动各个约束条改变约束范围, 并可多次运行优化设计, 直到得到满意的设计结果为止。值得注意的是优化变量和不确定性变量的上下限值要合理地确定, 另外, 也可以先不考虑鲁棒性, 即先不设不确定性变量进行优化设计, 在得到较

好的控制参数以后,再进行鲁棒性设计。在内环优化设计完成后再将断开的连线复原。

3.3.2 转速环的优化设计

双击图 3 所示的“优化工具 1”打开优化设计窗,设定待优化变量 K_n, τ_n, τ_{dn} 及其下限值、上限值和不确定性参数变量 τ_m, τ_l 及其变化范围等参数,再进行优化设计,方法和上述电流环优化设计相类似。优化后系统阶跃响应曲线(ω 为相对转速)进入约束范围之内,且超调量大为减小,调节时间大大缩短,如图 4 所示(超出约束范围的曲线是优化设计以前的)。

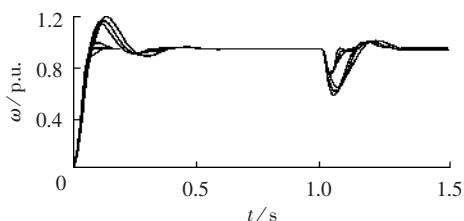


图 4 非线性系统优化设计后的阶跃响应

Fig.4 Optimized step response of non-linear system

4 设计示例

4.1 系统参数及动、静特性要求

已知某双闭环可逆直流调速系统,电动机及主回路参数如下:电动机额定值为 220 V, 135 A, 1 000 r/min, $C_e=0.166 \text{ V} \cdot \text{min}/\text{r}$, $\lambda=1.5$, $GD^2=35.52 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 主回路总电阻 $R=0.5 \Omega$, 总电感 $L=15 \text{ mH}$, 可控整流装置放大倍数 $K_s=40$, 延迟时间常数 $\tau_s=0.0017 \text{ s}$ 。要求双环无静差, 动态特性要尽可能好, 且在系统 τ_m, τ_l 变化 $\pm 40\%$ 时具有良好的鲁棒性。

4.2 参数计算及初值确定

用工程设计法确定系统参数及两个调节器控制参数的初值。取 $b=0.05 \text{ V}/\text{A}$, $a=0.01 \text{ V} \cdot \text{min}/\text{r}$, $\tau_{oi}=0.002 \text{ s}$, $\tau_{on}=0.01 \text{ s}$, $U_{gnm}=10 \text{ V}$, $U_{gim}=6 \text{ V}$, 外环中频宽 $h=5$ 。其他计算由 M 文件程序完成, 运行 M 文件程序得到两个调节器参数初值后再进行优化设计和鲁棒性设计。

4.3 设计结果分析

两个调节器按工程设计法得到的参数分别为 $K_i=1.0315$, $\tau_i=0.03 \text{ s}$, $K_n=10.3034$, $\tau_n=0.087 \text{ s}$, $\tau_{dn}=0.0638 \text{ s}$, 其中 τ_{dn} 按转速无超调公式设计。本方法优化设计得到的参数分为 $K_i=1.2110$, $\tau_i=0.0288 \text{ s}$, $K_n=5.0056$, $\tau_n=0.01 \text{ s}$, $\tau_{dn}=0.0371 \text{ s}$ 。图 5 和图 6 是按工程设计法和本文所讨论的优化设计法设计的系统对比仿真波形, 分别是 0 启动到额定转速的 10% 和从 0 启动到额定转速时的转速 n 、电流 I_d 波形, 且都是在 1 s 时突加 100 A 的负载扰动。

馈时, 超调量和扰动时的转速降都很大, 而有微分负反馈时, 虽然转速无超调, 但启动时间和抗扰恢复时间拖得太长并且电压和电流产生激烈振荡; 优化后转速无超调, 启动和抗扰恢复过程都快很多且电压、电流变化快而又没有振荡, 可见电流环对电流跟踪快速而平稳, 抗扰性能也很好。

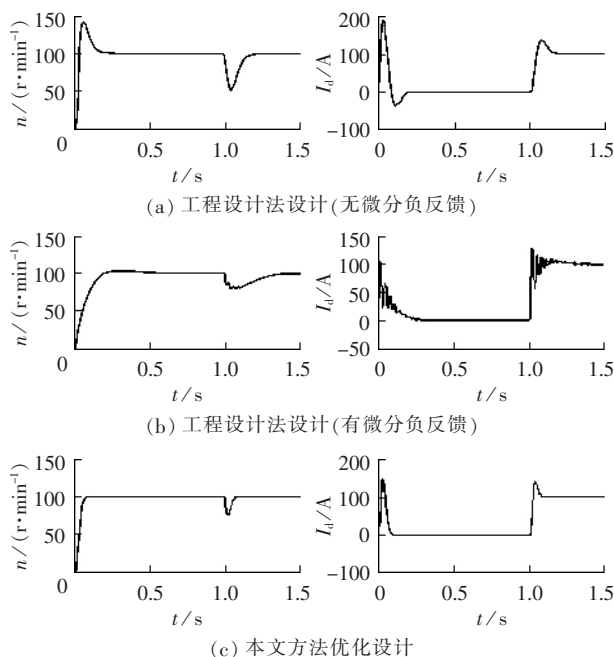


图 5 转速启动到 10% n_{nom} 时系统对比波形

Fig.5 Speed and current waveform comparisons from startup to 10% n_{nom}

从对图 6 的波形对比分析可以看出, 优化前电流上升到最大值后过早开始下降从而造成转速上升时间和调节时间拖得太长, 同样抗扰恢复时间也长。而优化后电机是在最大电流的作用下, 转速以最大的加速度成直线上升从而使启动时间最短, 实现了启动时间的最优控制, 并且几乎看不出超调和负载扰动引起的转速降落, 各个波形非常接近理想启动状况。

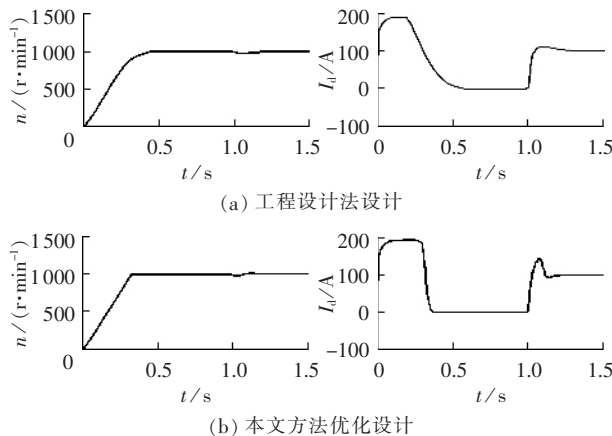


图 6 转速启动到 n_{nom} 时系统对比波形

Fig.6 Speed and current waveform comparisons from startup to n_{nom}

从图 5 对比分析可以看出, 优化前, 无微分负反

图 7 是采用本方法进行鲁棒性设计后, τ_m, τ_l 变化 $\pm 40\%$ 时系统的阶跃响应曲线(相对转速 ω)。从图中可看出, 这些曲线都在严格的约束范围之内, 说明系统具有很好的动、静态特性和良好的鲁棒控制特性, 完全满足系统设计的要求。要注意的是, 这是低速启动(100 r/min)并在时间为 1 s 时加入 100 A 强烈负载扰动时的转速波形, 故扰动产生的转速降看起来显得较大, 实际上系统的抗负载扰动特性很好, 见图 6(b)的转速曲线。

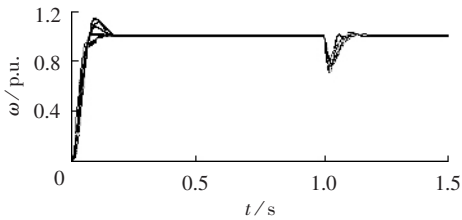


图 7 鲁棒性设计后系统的阶跃响应

Fig.7 Step response of system with robust design

5 结论

仿真结果表明, 本文研究的非线性控制系统的鲁棒性设计方法是有效的, 该方法不但简单直观, 方便快捷, 而且非常准确有效。使用该方法能极大地加快含有典型非线性环节控制系统的分析和设计过程并且能得到优化的设计结果, 使设计的系统具有良好的鲁棒控制特性, 从而极大地降低设计成本, 提高设计水平和质量。

参考文献:

- [1] 吴旭升, 马伟明, 王公宝, 等. 基于小波变换和 Prony 算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 38-42.
- [2] 蔡超, 陈光东, 段三丁, 等. 最小二乘法在感应电机参数辨识中的应用研究[J]. 武汉化工学院学报, 2003, 25(2): 57-59.

- CAI Chao, CHEN Guang-dong, DUAN San-ding, *et al.* A study on parameter estimation of induction motor using least square method[J]. *J. Wuhan Inst. Chem. Tech.*, 2003, 25(2): 57-59.
- [3] 丁坚勇, 陈允平. 基于 ELMAN 神经网络的同步电机动态参数在线辨识[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 22-25.
- DING Jian-yong, CHEN Yun-ping. On-line dynamic parameter identification of synchronous machines based on ELMAN neural networks[J]. *Power System Technology*, 2002, 26(4): 22-25.
- [4] 徐小增, 李叶松, 秦忆. 基于参数辨识的磁场定向感应电机自适应控制[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2002, 41(6): 26-29.
- XU Xiao-zeng, LI Ye-song, QIN Yi. Adaptive control of vector-controlled induction motor based on parameter identification[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2002, 41(6): 26-29.
- [5] 李鸿儒, 白湘波, 顾树生. 基于神经网络的永磁同步电机的鲁棒控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2001, 22(4): 362-365.
- LI Hong-ru, BAI Xiang-bo, GU Shu-sheng. Neural-network-based robust control of PM synchronous motor[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2001, 22(4): 362-365.
- [6] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析——Matlab 语言应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] 范影乐, 杨胜天, 李轶. Matlab 仿真应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [9] 黄文梅, 杨勇, 熊桂林. 系统分析与仿真——Matlab 语言及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999.
- [10] 周金萍, 王冉, 吴斌. Matlab 6 实践与提高[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(责任编辑: 李玲)

作者简介:

潘湘高(1963-), 男, 湖南平江人, 副教授, 硕士, 主要从事自动化技术、计算机控制的研究和教学工作(E-mail: pxg987654321@163.com)。

Optimum design of robust regulation system for generator speed

PAN Xiang-gao

(Hunan University of Arts and Science, Changde 415003, China)

Abstract: The optimum design of robust regulation system for generator speed is studied with Matlab. With a dual-closed-loop speed regulation system as example, the method and its implementation steps in visual simulative environment of Matlab/Simulink are introduced, and the waves before and after optimization are compared. Results show that the system designed has better dynamic, static and robust performances.

This project is supported by Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department(03C272).

Key words: non-linear system; optimum design; robust design; modeling; simulation