

直流电机双闭环调速系统(DLM)的建模与辨识

李永龙¹, 李祖枢^{1,2}, 王 牛¹

(1. 重庆大学 智能自动化研究所, 重庆 400044; 2. 重庆工学院 人工智能系统研究所, 重庆 400050)

摘要: 运用特征分析和“类等效”建模的方法, 把直流电机双闭环调速系统的模型, 简化成一个简单的具有非线性特性的状态空间模型. 进而提出了通过实测系统的转速响应, 利用改进的遗传算法对该模型参数进行精确辨识的方法. 为检验方法的有效性, 对该模型和常用模型进行了对比性验证实验. 实验结果表明由此建模和参数辨识方法建立的模型结构合理, 参数辨识精度高, 可以很好的替代实际调速系统进行系统的设计.

关键词: 双闭环调速系统; 模型辨识; “类等效”建模; 遗传算法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Modeling and identification of double loop DC motor(DLM) control system

LI Yong-long¹, LI Zu-shu^{1,2}, WANG Niu¹

(1. Institute of Intelligent Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Artificial Intelligence System, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: Using the method of characteristic analysis and “quasi-equivalent” modeling, we reduce the model of the double loop DC motor control system to a simple non-linear state space model, and then, apply the improved genetic algorithm to accurately identify the model parameters, based on the real rotational speed response. This method is validated by comparing the reduced model with other conventional models. Experimental results show that the proposed method has a reasonable structure with parameters to be identified accurately. It is applicable to the design of the real DLM control systems.

Key words: DLM; model identification; “quasi-equivalent” modeling; genetic algorithm

1 引言(Introduction)

在直流电机的实际应用中, 为了得到较好的静、动态性能, 经常需要构建电流、转速双闭环调速系统(DLM)来控制直流电机^[1].

由于直流电机应用的普遍性, 双闭环调速系统的研究已有很多先例, 但大部分研究都集中在内部控制器结构和控制参数的整定上^[2~4]. 而双闭环调速系统往往作为执行机构成为实际系统中的一个重要部分. 为方便整个系统的设计与研究, 精确地建立双闭环调速系统的模型十分必要. 前期研究, 主要有软件模拟或简单数据分析建立模型的方法^[5,6], 但这些方法建立的线性模型显然不能反映真实系统.

“类等效”建模的方法^[7], 通过对实际对象的定性了解, 根据实际对象动态特性的主要特征量, 建立结构合理的简化数学模型.

本文从双闭环调速系统的特征出发, 利用“类等

效”建模的方法, 建立了简化非线性状态空间模型, 采用改进遗传算法对模型参数进行了精确辨识, 并进行了验证实验.

2 “类等效”简化模型的建立(System “Quasi-equivalent” sample modeling)

2.1 问题阐述(Problem expounding)

双闭环调速系统由直流电动机环节; 功率驱动环节; 电流、转速控制环节共同构成. 通过推导^[1], 可以得到双闭环调速系统的动态结构图, 如图1.

双闭环调速系统为了实现转速和电流两种负反馈的作用, 分别设置了转速调节器 W_{ASR} 和电流调节器 W_{ACR} . 两个调节器一般都采用PI调节器, W_{ASR} 在实际运行中可能处于不饱和、饱和的两种状态. 其次, 双闭环调速系统包含了电流、转速两个控制回路, 所以系统不能简单地用线性控制理论分析. 文献5中, 用式(1)是不能正确描述该系统的.

$$G(s) = \frac{k_p \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot k_x \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (1)$$

其中: k_p 为比例系数, k_x 为阻尼系数, ω_n 为无阻尼自振角频率.

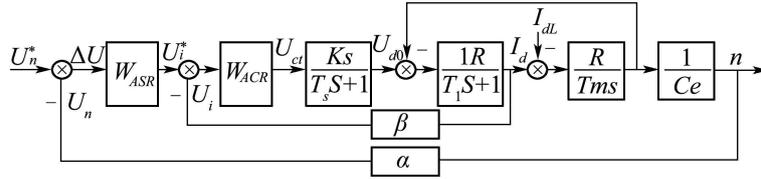


图1 双闭环调速系统的动态结构图^[1]

Fig. 1 Dynamic structure of DLM^[1]

2.2 模型的建立(Modeling)

图2是双闭环调速系统零初始状态下, 启动时的转速特性曲线, 根据特性曲线的特征, 整个过程分为电流上升段、恒流升速段和转速调节段3个阶段.

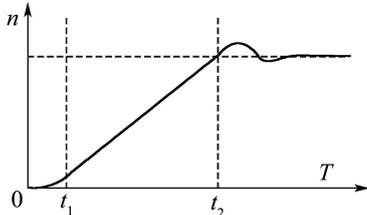


图2 双闭环调速系统启动时转速波形^[1]

Fig. 2 The speed startup wave of DLM^[1]

在0 ~ t_1 时间段是电流上升段. 系统突加给定 U_n^* 后, W_{ASR} 的输入偏差电压 $\Delta U = U_n^* - U_n$ 较大, W_{ASR} 的调节参数在实际设定时也较大, 所以 W_{ASR} 很快进入了饱和, 输出值 U_i^* 达到最大值 U_{i^*max} . 而电流调节器 W_{ACR} 在 U_i^* 最大值的输入作用下, 电流 I_d 迅速上升, 当 I_d 达到最大值时, 这个阶段结束. 由于整个过程时间非常短, 转速变化不大, 我们把系统等效为一个 τ 时间的纯滞后. 在数学表达上表示为转速给定的一个纯滞后, 表达为 $U_n^*(t - \tau)$.

在 $t_1 \sim t_2$ 时间段是恒流升速段, 这个过程持续到转速值超过给定值. 由于这个阶段 ΔU 一直为正, 所以 W_{ASR} 一直处于饱和状态. W_{ASR} 的输出 U_i^* (也就是电流给定)保持在最大值 U_{i^*max} , 转速环只是提供了一个恒定的电流给定 U_{i^*max} , 即电流调节器在恒定的给定下运行. 同时由于 W_{ACR} 作用, 电流 I_d 保持在最大值, 转速表现为加速度恒定的线性增长, 如图2. 根据“类等效”模型简化的方法^[7], 可以把系统中电机与电流环等效为一个积分环节, 并设积分时间常数为 T_2 , 如图3中的I所示.

在 t_2 时刻后系统进入了转速调节段. 此时转速

超调, ΔU 为负, 使 W_{ASR} 从饱和值降下来, 退出饱和状态. 这样 W_{ASR} , W_{ACR} 都不饱和, 同时起调节作用, 系统表现为线性系统.

上述分析中, 可以看到, W_{ASR} 在整个过程中, 从不饱和进入饱和态, 又从饱和值退出饱和态. 因此我们用一个比例、积分和饱和非线性环节来表示 W_{ASR} , 如图3中II部分. 设比例系数为 K , 积分时间常数为 T_1 , 饱和非线性环节的线性域宽度为 λ . 饱和特性影响了系统的整体性能. 则双闭环调速系统的动态结构图可以简化为图3的形式.

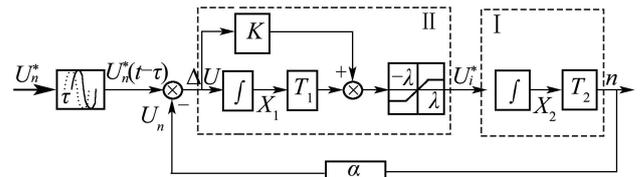


图3 双闭环调速系统的简化模型

Fig. 3 The simple model of DLM

采用图3定义的状态变量, 系统的状态空间模型可以简化为式(2):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = U_n^*(t - \tau) - \alpha T_2 x_2, \\ \dot{x}_2 = K U_n^*(t - \tau) - \alpha K T_2 x_2 + T_1 x_1, \\ y = T_2 x_2, \\ -\lambda \leq \dot{x}_2 \leq \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

通过如上推导, 双闭环系统的模型简化为带有未知参数($T_1, T_2, K, \alpha, \lambda, \tau$)的状态空间模型, 得到了可以完全描述系统的一个模型表示. 式(2)中 $-\lambda \leq \dot{x}_2 \leq \lambda$ 反映了模型内部饱和的特性.

在仿真计算中, 若已知系统 t 时刻状态, 计算 $t + \Delta t$ 时刻的状态有3个步骤:

1) 线性计算. 先假设 $t + \Delta t$ 时刻 W_{ASR} 还未饱和, 系统表现出线性系统的特性. 则利用式(2), 并忽略 $-\lambda \leq \dot{x}_2 \leq \lambda$, 直接计算系统的各状态与输出.

2) 饱和上限修正. 如果在线性计算后, 出现 $\dot{x}_2 > +\lambda$, 说明 $t + \Delta t$ 时刻的 W_{ASR} 调节器达到饱和上限值, 线性计算得到的 W_{ASR} 输出值 \dot{x}_2 , W_{ASR} 内部状态 x_1 已经不是真实值. \dot{x}_2 真实值应为 λ , 把 λ 代入式(2), 可以反求出 x_1 状态的真实值. 则对 \dot{x}_2, x_1 以及输出 y 需要进行如式(3)的修正:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \lambda, \\ x_1 = (\lambda - KU_n^*(t - \tau) + \alpha KT_2 x_2) / T_1, \\ y = T_2 x_2. \end{cases} \quad (3)$$

3) 饱和下限修正. 同理如果在线性计算后, 出现 $\dot{x}_2 < -\lambda$, \dot{x}_2, x_1, y 需要进行如式(4)的修正:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -\lambda, \\ x_1 = (-\lambda - KU_n^*(t - \tau) + \alpha KT_2 x_2) / T_1, \\ y = T_2 x_2. \end{cases} \quad (4)$$

3 模型参数的精确辨识(The precise identification of parameters for system model)

由于式(2)中的参数 $(T_1, T_2, K, \alpha, \lambda, \tau)$ 在实际系统中难以精确测量, 因此按传统的方法难以获得有效的模型. 本文根据容易测量得到的实际转速响应数据, 采用改进的遗传算法实现对上述参数的精确辨识. 这样的辨识方法得到的参数精度高, 更加能反映实际系统.

遗传算法是一种具有广泛适用性的优化搜索算法. 古建功、李祖枢等人^[8,9]通过引入海明距离、正交试验设计、动态编码、多点变异、反馈式突变等思想, 有效解决了在传统遗传算法中“近亲繁殖”与早熟收敛等问题.

结合模型辨识的特点, 选取评价函数为

$$f(Z) = \sum_{i=1}^m (n(i) - \hat{n}(i))^2. \quad (5)$$

其中: $n(i), \hat{n}(i)$ 分别表示实际系统和简化模型在第 i 个采样时刻的转速值, m 表示采样点的数目. 因此, 本优化问题就归结为实现目标 $\min f(Z), L < Z < U$, 其中 L, U 为模型参数 Z 的可行解空间. 改进遗传算法的实施步骤请参考文献^[8,9].

4 验证实验(Validating experiment)

上述部分已经得到了双闭环调速系统的非线性简化模型, 并且引入改进遗传算法作为辨识手段. 为了验证模型的正确与优越性, 我们以建立单套 MAXON RE36 直流电机双闭环调速系统的模型为实验目的, 验证上述结论.

MAXON RE36 直流电机双闭环调速系统由 MAXON RE36 直流电机, MAXON ADS50/5 驱

动器和 HEDL 5500 编码器构成. 从 ADS50/5 驱动器的内部结构上看, 该驱动器不但起到了功率放大的作用, 而且通过内部放大器构成了转速和电流的反馈控制. 其电流环和转速环均采用了 PI 控制器, 是一个典型的双闭环调速系统.

为双闭环调速实验系统建立如式(2)的模型结构, 共有 6 个参数需要辨识. 为了辨识需要, 以 5 ms 采样频率采集不同给定下转速响应的数据, 如图 4. 纯滞后时间 τ 可以直接从图 4 中测量, $\tau = 0.04s$. 其他 5 个参数 $(T_1, T_2, K, \alpha, \lambda)$ 很难通过直接测量获取, 因此采用改进遗传算法对其辨识.

将这 5 个参数编码为 $Ch = \{T_1, T_2, K, \alpha, \lambda\}$, 先通过图 4 中给定为 100 r/min 的转速响应数据, 估算出参数的初始值 $Ch_{estim} = \{10, 1.6, 0.9, 1.01, 100\}$.

设定群体大小 $M = 200$, 交叉率 $P_c = 0.1$, 变异率 $P_m = 0.1$, 种群进化的代数 $N = 3000$. 计算染色体的适应度(式 5)时, 采用在 100 r/min 给定下 2.5 s 的启动数据(采样点的数目 $m = 2.5s/5ms = 500$), 仿真的时间步长为 0.005 s, 解微分方程的算法是固定步长的 4 阶龙格库塔法.

实验中, 随着进化代数增长, 适应度迅速降低, 在接近 1000 代时最佳个体的适应度平稳在 $35 (r/min)^2$ 附近, 寻找得到较优的参数 $(10.20, 1.4, 0.35, 1.04, 117.25, 0.04)$. 此直流电机的转速范围是 0~250 r/min, 在 50 r/min, 100 r/min, 150 r/min, 200 r/min 不同的初始给定下, 等效模型的响应如图 4 中实线部分.

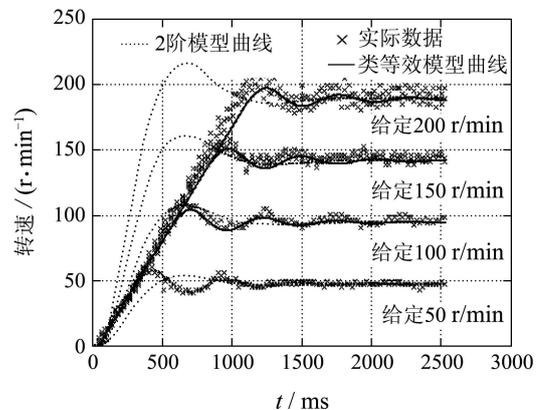


图 4 验证实验结果

Fig. 4 The result of validating experiment

为了比较差异, 对系统建立如式(1)的二阶模型. 仍采用上述的改进遗传算法进行辨识, 辨识后, 最佳个体适应度为 165, 最佳个体 $k_p = 0.97$, $\omega_n = 5.9, k_x = 0.54$. 2 阶模型在不同给定下响

应,如图4的虚线部分.

首先从给定为100 r/min的仿真效果上对比. 适应度代表了双闭环调速系统在500个采样时刻,实际系统和被辨识模型的误差平方和. 在非线形简化模型的仿真过程中,最佳个体的适应度为 $35(\text{r/min})^2$. 每个时刻的平均误差平方为 $35/500 = 0.07(\text{r/min})^2$,模型参数辨识达到了很高的精度. 而二次模型最佳个体的适应度为165,是本文模型的4~5倍. 其次从整个转速范围内分析,明显可以得到,虽然在100 r/min二次模型和实际曲线比较吻合,但是在其他转速下与实际数据差别较大. 而本文的模型在整个转速范围内都与实际数据的偏差较小,可以代替实际系统.

从以上的对比分析看,本文建立的模型,定性与定量上都明显优于传统的2阶模型. 从简化模型建立的过程看,模型在简化过程中,首先保留了双闭环调速系统主要的特征—非线性,其次根据在恒流升速段的恒加速度特征对系统进行了简化;而辨识过程中,又引入改进遗传算法来得到高精度的辨识参数,这些都保证了简化模型保存了双闭环调速系统的主要特征,结构合理,精度较高.

5 结束语(Conclusion)

从直流电机双闭环调速系统的模型出发,应用“类等效”建模方法,把模型简化成为一个非线性状态空间模型. 模型的参数通过改进遗传算法得到了精确的辨识. 模型结构和辨识方法在MAXON RE36直流电机双闭环调速系统上进行了比较性验证,验证结果表明参数辨识的精度高、模型结构正确. 该模型可以广泛应用于双闭环调速系统的分析和设计. 同时,这种模型辨识的思想也可以应用于其它非线性系统模型的辨识.

参考文献(References):

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
(CHEN Boshi. *Electric Drive Automatic Control System*[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1997.)
- [2] 周凯汀, 郑力新. 基于MATLAB的双闭环直流调速系统仿真及参数进化设计[J]. 计算技术与自动化, 2001, 20(2): 10 – 14.
(ZHOU Kaiting, ZHENG Lixin. Simulation and parametric evolutionary computation of double loop DC motor control system based on MATLAB[J]. *Computing Technology and Automation*, 2001, 20(2): 10 – 14.)
- [3] 李威震, 于敬玲. 基于MATLAB的双闭环可逆直流调速系统的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2004, 21(11): 42 – 44.
(LI Weizhen, YU Jingling. Simulation of DC Double-loops speed control system based on matlab[J]. *Computer Simulation*, 2004, 21(11): 42 – 44.)
- [4] ZHAO Yao, DING Longshan. Intelligent control of parallel Double-loop DC motor speed control systems[C]// *Proceedings of the 3th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hefei: IEEE Press, 2000: 416 – 418.
- [5] 黄永志, 陈卫东. 两轮移动机器人运动控制系统的设计与实现[J]. 机器人, 2004, 26(1): 40 – 44.
(HUANG Yongzhi, CHEN Weidong. Design and implementation of motion controller of two wheeled mobile robot[J]. *Robot*, 2004, 26(1): 40 – 44.)
- [6] 何艳丽, 吴敏, 曹卫华. 自主机器人直线行过程的数字PID控制[J]. 现代电子技术, 2005, 28(13): 58 – 60.
(HE Yanli, WU Min, CAO Weihua. Digital PID control in the process of autonomous robot moving in straight line[J]. *Modern Electronics Technique*, 2005, 28(13): 58 – 60.)
- [7] 李祖枢. 仿人智能控制理论与多级摆的摆起控制[M]//涂序彦. 人工智能: 回顾与展望. 北京: 科学出版社, 2006: 174 – 207.
(LI Zushu. The theory of human-simulated intelligent control and multi-pendulum swing-up control[M]//TU Xuyan. *Artificial Intelligence: Review and Prospect*. Beijing: Science Press, 2006: 174 – 207.)
- [8] 李祖枢, 张华, 古建功, 等. 3关节单杠体操机器人的动力学参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 242 – 246, 252.
(LI Zushu, ZHANG Hua, GU Jianguo, et al. Dynamic parameters identification of three-link acrobot on horizontal bar[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 242 – 246, 252.)
- [9] 古建功. 遗传算法在仿人智能控制中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
(GU Jianguo. *The application of GAs in human-simulated intelligent control*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.)

作者简介:

李永龙 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为仿人智能控制与足球机器人, E-mail: bruce.lee.long@163.com;

李祖枢 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为仿人智能控制与智能机器人, E-mail: zushuli@vip.sina.com;

王牛 (1974—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能控制、智能机器人、复杂系统控制、模式识别与图像处理.