

基于 ITAE 的天线伺服系统的 自寻优模糊控制

李生明

(清远职业技术学院 机电与汽车工程学院, 广东 清远 511510)

摘要:为实现天线伺服系统的动态性能与稳定性能达到最优控制的目的, 可设计基于 ITAE 的模糊自寻优控制器, 实现对参数进行自寻优以使系统性能达到 ITAE 最优。对于天线伺服系统, 采用模糊控制器设计的一般步骤设计模糊控制器, 再以 ITAE 积分性能指标作为目标函数, 对调整因子不断进行校正, 以使系统性能达到最优。在 MATLAB 环境下对系统进行了仿真研究, 并与常规 PID 控制进行比较, 结果表明基于 ITAE 的模糊自寻优控制器的响应特性远优于传统的 PID 控制器, 响应速度更快, 稳态精度更高, 鲁棒性更强。

关键词:天线伺服系统; ITAE; 模糊自寻优

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1674-4896(2014)03-0016-04

1 引言

随着现代科学技术的发展, 对天线伺服系统的控制要求越来越高。高精度快速运动的天线伺服系统广泛应用于现代高科技通信领域以及现代军事等领域^[1-2]。天线伺服系统属于随动系统, 它是一种给定信号随时间变化, 且变化规律不能事先确定的控制系统, 随动系统的任务是在各种情况下快速准确地使被控量跟踪给定量的变化^[3]。一般高精度的天线伺服系统要求有定位和等速跟踪功能, 定位控制精度高, 响应速度快, 等速跟踪平稳^[4]。

对天线伺服控制系统有着多种不同的控制方法, 如文献^[5]中使用的传统 PID 控制, 在理想的情况下可取得满意的使用效果, 但在对速度与精度要求较高的高性能的场合不能满足要求。文献^[6]中所应用的神经网络自适应控制的方法, 对系统参数不易精确确定及非线性不易定量描述的天线随动系统的控制, 系统的输出精度高、响应速度快, 具有相当强的鲁棒性。文献^[7]所应用的滑模控制具有使系统实时适应性加强, 减小干扰敏感性, 提高系统的鲁棒性能等优点。

针对天线伺服系统不易建立精确的数学模型, 且对控制要求较高。研究表明模糊控制器的量

化因子和调整因子对系统性能具有一定的影响, 当系统的参数、给定量以及扰动发生变化时, 如果量化因子和调整因子不随之改变, 系统就难以达到满意的控制效果。所以, 为了保证系统的控制精度, 要求控制器具有参数自动调整的功能。当系统的参数不确定以及变化时, 仅凭人工经验进行参数的调整, 很难获得一组最佳参数。本文提出并设计了一种基于 ITAE 性能指标的自寻优模糊控制器, 以实现在线优化天线伺服控制系统转角控制器的模糊控制规则来提高系统的性能。

2 天线伺服系统的数学模型

本文中天线伺服系统的基本功能是使天线的轴线跟随目标视线并尽可能地使两者保持重合。天线伺服系统由电压放大器、PWM 功率放大器、执行电机、位置测角装置以及天线等许多装置设备组成。天线伺服系统的结构模型可以用如图 1 所示的框图来表示, 其中 φ_r 为系统参考角位置的输入信号, φ_e 为其输出角位置信号。 φ_e 在控制器的作用下在一定的误差允许范围内渐近跟踪输入 φ_r 变化的轨迹。由该图可看出, 该天线伺服系统为典型的双闭环控制系统, 内环为速度环, 外环为位置环, 速度环能为系统实现快速准确的定位和跟

收稿日期:2013-9-24

作者简介:李生明(1968-), 男, 湖北云梦人, 副教授, 研究方向为电气控制。

踪提供基础与条件。

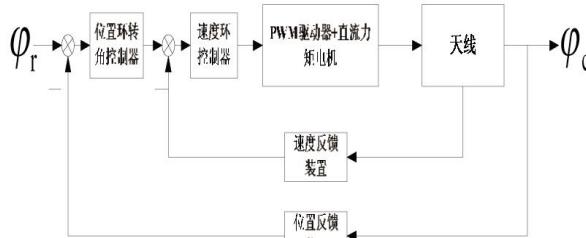


图 1 天线伺服转角控制系统的结构框图

建立天线转角伺服系统的数学模型时,需要将各个环节适当的考虑进去。并且在对各部分环节的特性充分了解的基础上,将一些非线性模型进行合理的线性化处理,并将执行电机与天线视为一个整体对象,最终得出被控对象理想的数学模型,如下图 2 所示

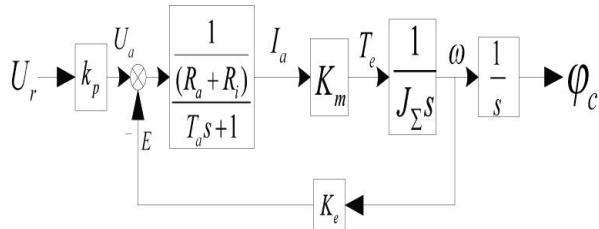


图 2 天线伺服系统的理想数学模型框图

其中, U_r 表示为控制电压; k_p 表示为 PWM 功率放大器的放大系数; U_a 表示电机的电枢电压; $T_a = \frac{L_a}{R_i + R_a}$, L_a 与 R_a 分别表示电枢电感和电枢电阻, R_i 表示桥式功率 MOS 管导通时的内阻; I_a 为电枢电流; K_m 表示为电机力矩系数; T_e 为电机电磁转矩; J_Σ 为系统的总转动惯量; K_e 表示电机的反电势系数; ϕ_c 为系统输出转角。

可见天线系统的传递函数为:

$$G_0(s) = \frac{\phi_c}{U_r} = \frac{K}{s[(1+T_a)s+1]} \quad (1)$$

$$\text{式中 } K = \frac{k_p}{K_e}, T_a = \frac{(R_i + R_a)J_\Sigma}{K_e K_m} \quad (2)$$

由于在大多数情况下电机的电枢电感较小,可近似为零, T_a 可近似为零,因此上面的传递函数可以简化为

$$\frac{\phi_c}{U_r} = \frac{K}{s(T_m s + 1)} \quad (3)$$

3 基于 ITAE 的自寻优模糊控制器的设计

ITAE (Integral Time Absolute Error) 是时间乘

以误差绝对值积分,它是一个综合了控制系统的快速性与稳定性的综合性能评价指标,其具有很好的工程实用性和选择性^[8]。基于 ITAE 自寻优模糊控制器的系统框图如图 3 所示。

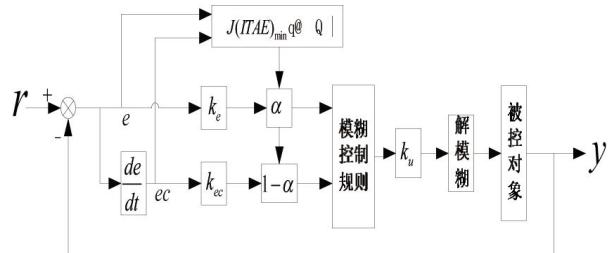


图 3 基于 ITAE 自寻优模糊控制器结构图

其中, e, ec 分别表示偏差及偏差变化率; k_e, k_{ec}, k_u 分别表示模糊控制器输入量化因子与输出的比例因子, α 为可调因子。

3.1 模糊控制器的设计

3.1.1 输入量及输出量的模糊化

模糊控制器的输入量为位置角度偏差 e 和偏差的变化率 ec ,输出控制量为 u ,将它们的变化范围定义为 $[-3, +3]$ 之间变化的连续量,然后再将这些连续的精确量进行离散化^[9]。取输入量 e 的语言变量为 E ,论域为 X ,输入量 ec 的语言变量为 EC ,论域为 Y ,输出控制量 u 的语言变量为 U ,论域为 Z ,论域 X, Y, Z 将其均划分为 7 个等级,即 $X=Y=Z=\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,其相应的模糊子集分别为 A_i, B_i, C_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$),它们的 7 个语言取值为 { 负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZE)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB) }。

3.1.2 模糊推理以及模糊控制规则表的建立

模糊控制器中常见的连续型隶属度函数有下列三种:吊钟形,梯形,三角形。本文中对误差以及误差变化率使用对称的三角形隶属度函数^[10]。

在实际的控制系统中,对一个常规的控制器控制过程的各个阶段,其对误差以及误差的变化均有不同的要求^[11]。在控制过程的初始阶段,系统的误差往往较大,误差是主要矛盾,控制系统的目的是消除误差,这时就希望误差值在控制规则中的加权系数应该大一些,反之,当控制过程趋向稳定阶段,这时系统误差已经很小。控制系统的重要任务是减小超调量,使系统尽快稳定,这就要求在控制规则中,把误差变化值的加权系数增大,仅用

单个可调整因子就无法满足这一要求,于是考虑在不同的误差等级引入不同的加权因子,以实现对模糊控制规则的自调整^[12]。因此,本文引入了具有4个可调整因子的模糊控制器,对每一个误差等级分别引入一个调整因子,所以控制规则可表示为:

$$u = \begin{cases} -[\alpha_1 E + (1-\alpha_1)EC], E=0 \\ -[\alpha_2 E + (1-\alpha_2)EC], E=\pm 1 \\ -[\alpha_3 E + (1-\alpha_3)EC], E=\pm 2 \\ -[\alpha_4 E + (1-\alpha_4)EC], E=\pm 3 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 \in [0,1]$, 由上述分析,可知。 $0 \leq \alpha_i \leq \alpha_{i+1} \leq 1$

3.1.3 解模糊

解模糊也称精确化,就是将用语言表达的模糊量转换成一个确定的量的过程,也就是根据输出量模糊子集的隶属度计算输出确定值。首先在某时刻获得的 e 与 ec 的值,从它们的隶属度函数曲线获得它们的隶属度;再根据模糊控制规则表进行相应的推理运算,求得各语言值的对应隶属度;最后运用重心法进行精确化计算,就可获得确定值^[13]。

通过单点模糊化,乘积推理以及重心法清晰化后可以得模糊控制器的输出为:

$$\Delta u = \frac{\sum u_{ij}^*(e, ec)}{\sum u_{ij}(e, ec)} \quad (5)$$

3.2 基于 ITAE 的调整因子自寻优过程

调整因子的选择对模糊控制器的动态特性有较大影响。对于具有多个可调因子的二维模糊控制器,随着可调因子的增多,凭着人工经验来调整 α_i 显然是比较困难的,这样不仅带有盲目性,而且很难获得一组最佳参数值,因此就也很难获得满意的过渡过程的动态特性。采用控制规则的自寻优的方法往往可以进一步优化控制律,以便获得更好的控制效果,这就是模糊控制器的自寻优过程。

为了能够实现对调整因子 α_i 进行寻优,可以采用被广泛应用于参数自寻优过程中的 ITAE 积分性能指标最小作为目标函数,

$$\text{即: } J(\text{ITAE}) = \int_0^{\infty} |e(t)| dt = \min \quad (6)$$

式中, $J(\text{ITAE})$ 表示误差函数绝对值与时间相乘之后的积分面积的大小。

上式表示的 ITAE 积分性能指标能够综合的评价控制系统的动态和静态特性,如响应速度快,过渡过程时间短,超调量小以及稳态误差小等指标。

为了计算机实现方便,将上式写成离散形式:
 $\Delta J = t |e| \Delta T = \min \quad (7)$

式中, e 为误差采样值; ΔT 为采样周期; t 为控制时间。

对于图3所示的模糊控制系统,取 K_i 固定不变,寻优矢量为 $X = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ 。寻优过程中必须满足的约束条件是: $0 < a_0 < a_1 < a_2 < a_3 < 1$ 。

根据所得到的性能指标,将上式作为目标修正函数,寻优过程中采取目标修正函数逐步减小的原则,不断地校正调整因子的取值,从而获得一组优选的加权因子,使得系统达到最优。

4 仿真研究

本文中所使用的天线模型的参数如下:电机的电枢电感为 $L_a=0.22\text{mH}$, 电机的电枢电阻为 $R_a=0.5\Omega$, 功率管内阻为 $R_i=0.008\Omega$, 电机反电动势系数为 $K_e=2\text{V/rpm}$, 电机的电磁力矩系数为 $K_m=10.1\text{Nm/A}$, 系统总转动惯量为 $J\Sigma=3.3\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 功率放大器的放大倍数为 $k_p=2$ 。考虑实际情况将以上参数带入式(3)可得被控对象近似的传递函数:

$$G_0(s) = \frac{1}{s(0.083s+1)} \quad (8)$$

在 MATLAB/SIMULINK 环境中建立基于 I-TAE 的自寻优模糊控制的天线伺服模型,并与传统的 PID 控制进行比较。运用 MATLAB 环境中的最优化工具,以 ITAE 指标最小情况下寻优后的寻优矢量为 $[0.187, 0.402, 0.617, 0.832]$ 。

优化后的模糊控制规则表如表1:

表 1 优化后的模糊控制规则表

U	EC _v						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PM	PM	PM
NM	PM	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	ZE	NS	NM	NM
PM	ZE	ZE	NS	NS	NM	NM	NM
PB	NM	NM	NM	NM	NB	NB	NB

基于 ITAE 的自寻优模糊控制与传统 PID 控制的系统跟踪阶跃信号与跟踪正弦信号的响应曲线分别如图 4、图 5 所示。

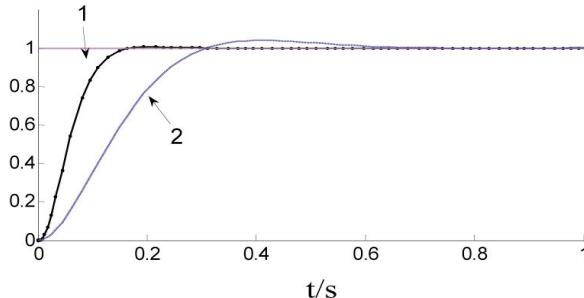


图 4 自寻优控制器阶跃响应曲线 1 与传统 PID 控制阶跃响应曲线 2

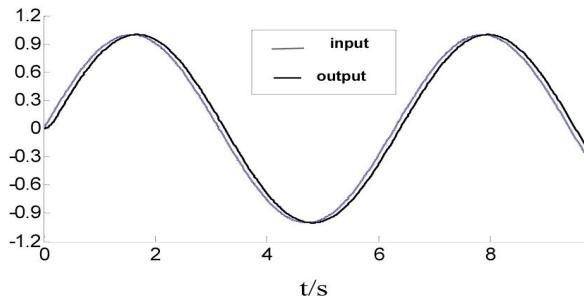


图 5(a)传统 PID 控制器正弦响应曲线

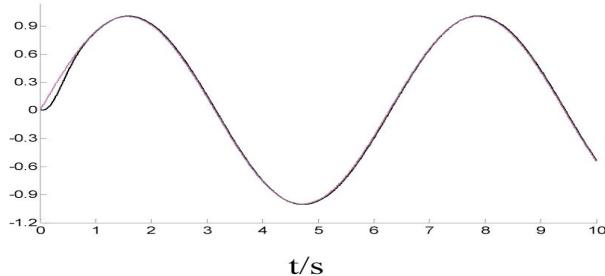


图 5(b)自寻优模糊控制器正弦响应曲线

由仿真结果可以看出, 基于 ITAE 的自寻优模糊控制器的单位阶跃响应超调量几乎为 0, 调节时间 0.15s。经过延时约 0.5s 就能很好的跟踪给定正弦信号。通过与常规 PID 控制器的仿真结果进行比较可以看出, 基于 ITAE 的自寻优模糊控制

器具有响应快, 超调小(或无超调), 运行平稳等优点, 从而使系统的控制性能得到改善。

5 结束语

本文设计了一种基于 ITAE 的自寻优模糊控制的天线伺服系统的控制器并进行了仿真。针对天线伺服系统高性能的要求, 采取 ITAE 准则调整可调因子, 通过控制参数的自寻优以调整控制规则来适应不同的工作状态。在 MATLAB/SIMULINK 环境中与传统的 PID 控制进行仿真对比, 仿真结果显示基于 ITAE 的自寻优模糊控制器的跟踪特性优于传统的 PID 控制器, 跟踪响应速度更快, 且稳态精度更高。所以本文提出的控制方案可以满足天线伺服系统的控制要求。

参考文献:

- [1] 刘艳, 李银伢, 戚国庆. 微型天线伺服系统保主导极点配置控制器设计[J]. 电光与控制, 2011(06):110.
- [2] 陈涛. 基于加速度回路的天线随动系统控制器设计[J]. 现代电子技术, 2011(03):98-99.
- [3] 尔桂花, 窦日轩. 运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 乔建江. 天气雷达天线伺服控制系统研究[J]. 河北省科学院学报, 2010(12):105-107.
- [5] 韩恩典. 数字 PID 在天线伺服控制中的应用[J]. 应用天地, 2010(10):111-113.
- [6] 王起飞. 神经网络自适应控制小功率天线随动系统[J]. 雷达与对抗, 1994(03):172-175.
- [7] 李洪科, 黄麟舒. 卫星通信天线伺服系统的离散滑模控制算法研究[J]. 测控技术, 2010(29):35-37.
- [8] 张福波. PID 控制器参数的 ITAE 最佳设定公式[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005(08):230-233.
- [9] 张德丰. MATLAB 模糊系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [10] 王立辛, 王迎军. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [12] 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [13] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

Antenna Servo System Based on the ITAE Self-optimal Fuzzy Control

LI Shengming

(College of Electromechanical Engineering, Qingyuan Polytechnic, Qingyuan Guangdong 511510, China)

Abstract: Abstract: In order to achieve optimal control of the dynamic performance and stability of antenna servo system, this paper designed a self-optimal fuzzy controller based on ITAE, by which the parameters can be self-optimal to achieve the best system performance. For the antenna servo system this article selected, the author adopted the general procedure of the fuzzy controller design, and then revised the adjustment factors with ITAE index as objective function, thereby enabling the system to achieve superior performance. The author carried on the simulation in the MATLAB environment and compared with the conventional PID controller's performance. The result showed that the response of self-optimal fuzzy controller based on ITAE was superior to the traditional PID controller in the response speed, stable precision and robust.

Keywords: Antenna servo system, ITAE, Self-optimal fuzzy

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>