

基于定量反馈理论的天线稳定平台跟踪控制系统设计

刘小明

(海军装备部西安地区军事代表局, 西安 710054)

摘要: 在对某天线稳定平台跟踪装置模型辨识并得到带有参数不确定性的线性模型的基础上, 根据定量反馈理论对俯仰轴的跟踪伺服系统进行鲁棒控制器设计。综合考虑被控对象的模型不确定范围和系统的稳定性能指标、抗干扰指标, 实现一定范围参数摄动系统的强鲁棒性。仿真结果表明: 在模型参数摄动时系统阶跃响应的超调量和调节时间基本一致, 验证了设计方法的可行性和有效性。

关键词: 定量反馈理论; 稳定平台; 鲁棒性能; 不确定性系统

中图分类号: V271.4; TN82 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2009)10-0083-04

Design of a Tracking Control System for Antenna Stabilized Platform Based on Quantitative Feedback Theory

LIU Xiaoming

(Military Representative Bureau of NED in Xi'an, Xi'an 710054, China)

Abstract: A linear model with uncertain parameters was gained by model identification of a certain antenna stabilized platform tracking device. The robust controller of pitch-axis tracking servo system was designed by using quantitative feedback theory. Taking consideration of the model's uncertainty range of the controlled object, and the system's stability and anti-interference capability, strong robustness of the model perturbation system was obtained in a certain range. The simulation results showed that the system step response overshoot was basically the same as the adjusting time when there was model parameter perturbation. Thus the feasibility and effectiveness of design method was verified.

Key words: quantitative feedback theory; stabilized platform; robustness; uncertain system

0 引言

定量反馈理论(Quantitative Feedback Theory, QFT)是将经典控制理论中频域校正器的设计理论在不确定对象鲁棒控制设计中的一种推广应用。它将被控对象的不确定范围和闭环系统频域性能指标用定量的方式在 Nichols 图中形成边界, 以开环频率特性曲线满足边界条件为要求, 通过回路成形(Loop shaping)技术对系统控制律进行设计和综合。早在 20 世纪 60 年代末, 这种理论方法就已基本形成, 但由于其在控制系统设计中需要进行大量的数字计算和复杂的图形分析, 因而很长一段时间未受到很高的重视。到了 20 世纪 80 年代末和 20 世纪 90 年代初, 随着计算机的普及和飞速发展以及各种 CAD 软件包的开发应用, 这种理论方

法才逐渐被许多学者认可并很快成为现今较为流行的一种鲁棒控制设计方法。国外在 QFT 控制理论的工程应用方面研究比较早, 美国、以色列等国家在此领域展开大量研究, 并将 QFT 控制理论广泛应用于飞机、导弹等以宽广的飞行包络、较强的机动性和灵活的敏捷性为特征的, 其动力学特性表现为严重的不确定性系统中^[1]。美国空军在此领域展开大量研究, 用 QFT 方法重新设计了 F-16 型战斗机的鲁棒飞行控制系统^[2], 并获得成功。目前国内在这方面也投入了一定的研究, 文献[3]已经研究将 QFT 控制方法应用在风云卫星姿态控制系统中, 结果表明设计的控制器在存在对象不确定性和外部干扰的情况下都能很好地满足性能指标; 文献[4-5]采用 QFT 理论设计了某型飞机的纵向着陆控制律, 并应用了推力综合控制稳定飞机下滑时的速度, 仿真结果显示: 飞机着陆实现了对期望着陆轨迹的精确跟踪, 满足了着陆控制的要求; 文献[6]研究在空空导弹飞行控制系统中应用了 QFT 控制

收稿日期: 2008-05-26

修回日期: 2008-08-27

作者简介: 刘小明(1967—), 男, 湖南新化人, 硕士, 高工, 研究方向为自动控制。

方法。

天线稳定平台要克服在载体运动颠簸的情况下保持天线波束指向不变,其跟踪控制系统建模复杂,建立精确模型非常困难,对控制系统的鲁棒性要求很高^[7]。因此,本文采用定量反馈理论对车载天线稳定平台跟踪伺服控制进行研究,设计出鲁棒性强的跟踪控制器。

1 天线稳定平台跟踪控制原理

某型移动载体稳定平台用于承载卫星通信系统,其核心问题就是解决如何在载体运动颠簸的情况下保持天线波束指向不变。系统采用方位-俯仰型两轴天线稳定。以地平面为基准,下轴与地面垂直,称为方位轴;上轴与方位轴垂直,称为俯仰轴。两轴均采用单轴角速度传感器(微机电陀螺)敏感天线的姿态变化,形成闭环反馈稳定。首先在静止状态接受来自GPS的载体方位信息,使用姿态传感器敏感载体的初始姿态,提供初始对准信号。在载体运动过程中,将惯性角速度传感器作为电机闭环伺服控制的反馈元件,敏感载体运动过程中天线平台在方位和俯仰两个方向的变化,通过一定的控制方式分别对两轴的角度变化进行补偿来保证载体运动过程中平台的稳定。控制原理示意图如图1所示。

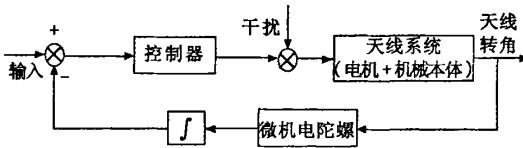


图1 控制原理示意图

Fig. 1 Sketch map of control principle

然而由于载体的机动性强,姿态变化快、幅度大,天线、机械本体在运动过程中固有特性的改变,尤其是电机及陀螺的性能改变,要求控制器对系统的控制具有相当强的鲁棒性能。以往的控制律采用经典控制理论和整定方法(其中包括PID控制方法),未考虑参数不确定性的影响,对系统的动态性能大多针对一个确定的辨识模型进行分析,具有一定的片面性。为此本文将在已有控制律的基础上,对其鲁棒性进行分析,并应用QFT技术对其进行再设计,以提高其稳定裕度和机动性。

2 QFT控制系统设计

2.1 基本概念及设计过程

QFT的设计目的是使含有不确定对象 P 的闭环控制系统,在指令输入 r 和干扰输入 d 的作用下,闭环响应曲线落在给定的指标范围内。其设计主要包括以下步骤^[8-9]:

1) 确定设计要求。给定并计算出控制系统所需要的性能指标。

2) 构造频率响应模板。选择一组有代表性的频率点,在每一个频率点处,求出系统的频率响应。由于系统模型具有不确定性,因此系统的响应在Nichols图上会形成一个区域,这个区域就是所谓的对象模板。

3) 生成边界曲线。边界曲线是根据性能指标来划分的,其中包括3种典型边界曲线:跟踪边界;稳定边界;鲁棒性能边界。

4) 控制器 G 设计。这是QFT设计的主要内容。在Nichols图上,通过移动和整形基准对象的开环频率响应曲线,使其满足边界要求。

5) 前置滤波器 F 设计。控制器 G 的作用仅能使闭环频率响应变化量小于或等于允许变化范围,而不能使闭环频率响应满足设计要求。因此,加入前置滤波器 F ,才可获得期望的闭环输入输出特性。

6) 设计结果分析。QFT的设计是一种近似设计,所选的对象模板和设计频率点都是有限的,设计出来的控制系统是否满足整个系统的要求,还必须通过分析才能确定。如果控制系统不满足设计要求,应重复上述步骤选择设计点并重新设计。

2.2 问题描述

经过采用普通的阶跃响应模型辨识方法(即给定阶跃信号,使用一定频率的硬件中断信号高速采集输出信号,并作平均,得出响应曲线),对天线系统和陀螺的模型初步认定为

$$\text{天线系统 } G_m(s) = \frac{K}{s^2 + a_1 s + a_2} ;$$

$$\text{速度陀螺 } G_i(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau}}{Ts + 1} \text{ (其中延时环节比较小,忽略不计).}$$

其中俯仰轴向的天线系统标定模型为

$$G_m(s) = \frac{517\ 166.758}{s^2 + 77.37s + 11\ 080} = \frac{517\ 166.758}{(s - 38.68 + 97.89i)(s - 38.68 - 97.89i)}$$

这里只对俯仰轴跟踪定位进行QFT控制作以详细分析,方位轴定位除了角度取值及天线系统的模型参数有所变化外,分析结论同俯仰轴基本一致,这里不作详细研究。

陀螺模型同样经辨识得到 $G_i(s) = \frac{344.8}{s + 3704}$,故得到俯仰轴的陀螺闭环控制系统示意图如图2所示。

在所取得的基准模型参数的基础上,设定陀螺参数在载体运动中不加改变,而天线系统即 $G_m(s)$ 的参数(即 K, a_1, a_2)变化幅度为 $\pm 10\%$,即 $K \in [465\ 450,$

568 883]、 $a_1 \in [69.7, 85.14]$ 、 $a_2 \in [9972, 12188]$ 。由此对系统进行 QFT 设计其鲁棒控制器。

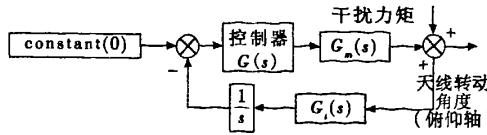


图 2 天线俯仰轴控制原理示意图

Fig. 2 Sketch map of antenna pitch axis control

2.3 性能指标

对于天线的俯仰轴控制系统而言, 必须满足鲁棒稳定性与输入端抗干扰性能。性能指标具体规定如下:

鲁棒稳定性能指标定义为

$$\left| \frac{G_m(jw) G(jw) G_i(jw) \frac{1}{jw}}{1 + G_m(jw) G(jw) G_i(jw) \frac{1}{jw}} \right| \leq \mu = 1.2, w \geq 0, \quad (1)$$

它所对应的最小幅值裕度为 $K_M = 1 + 1/\mu = 1.769$ ($20 \lg 1.769 = 4.96$ dB), 最小相角裕度为 $\Phi_M = 180 - \arccos(0.5/\mu^2 - 1) = 45^\circ$ 。

被控对象输入端抗干扰性定义为

$$\left| \frac{G(jw)}{1 + G_m(jw) G(jw) G_i(jw) \frac{1}{jw}} \right| \leq 0.06, w \in [1, 30]. \quad (2)$$

2.4 用 QFT 方法进行控制器设计

首先在频率范围内选择一个由如下独立点构成的试验频率序列, $w = \{0.1, 3, 5, 10, 30\}$ 。根据 3 个参数 K , a_1, a_2 的不确定范围, 共选择 60 个模型的状态点, 并选择第 16 个状态点作为设计中的标称点^[11]。使用 Matlab 中的 QFT 工具箱, 可以得到这些频率点的“对象模板”, 如图 3 所示, 同时也可以得到如上所述的两种性能指标所规定的边界, 以此为依据进行下面的步骤。图 4 所示为鲁棒稳定性能及输入抗干扰性能两种边界的交集, 为了保证要求的稳定裕度及输入性能, 系统的开环频率响应 $L(jw)$ 必须位于鲁棒稳定边界之外, 并同时位于输入抗干扰性能边界之上。控制律设计用到 Nichols 图和经典的回路整形思想, 目的是合成一个控制器 $G(s)$, 使之对基准开环特性进行动态补偿, 以使每一频率的性能都能满足边界要求。在设计过程中, 通过调整增益、填加超前/滞后环节、增添实极点、零点以及负极点、零点等环节共同设计 $G(s)$, 最终结果如下:

$$G(s) = \frac{133(s + 16.5)(s + 20)(s + 30 + 147i)(s + 30 - 147i)}{(s + 1.14)(s + 450)(s + 480)(s + 1500)} \quad (3)$$

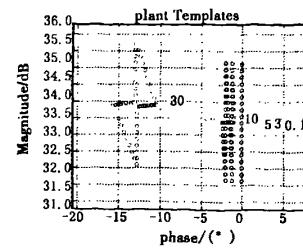


图 3 俯仰轴伺服系统样本频率响应图

Fig. 3 Pitch-axis servo system sample frequency response diagram

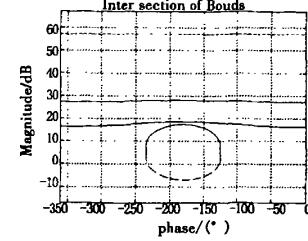


图 4 鲁棒稳定与输入特性性能边界的交集

Fig. 4 Intersection of the robust stability and the performance boundary of the input characteristics

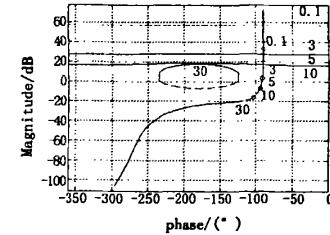


图 5 没有控制器时的开环频率响应

Fig. 5 The system open-loop frequency response without controller

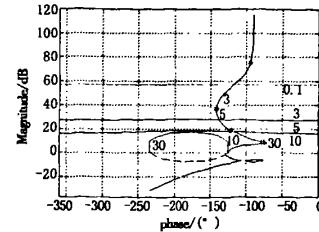


图 6 控制器作用下的开环频率响应

Fig. 6 The system open-loop frequency response with controller

2.5 性能验证与仿真

经 QFT 控制设计得到的系统性能分析如图 7 和图 8 所示。

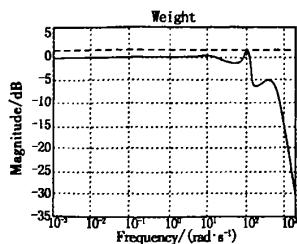


图 7 系统鲁棒稳定性能分析

Fig. 7 The analysis of system robust stability

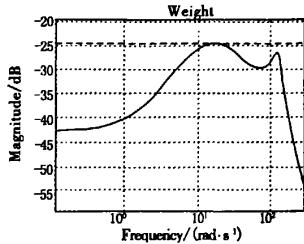


图 8 系统输入抗干扰性能分析

Fig. 8 The analysis of system input anti-jamming performance

由上图可看出控制器的设计满足了给定的动态性能指标,包括鲁棒稳定裕度和输入抗干扰性能的限制。图 9 给出在模型摄动条件下的系统阶跃响应结果。

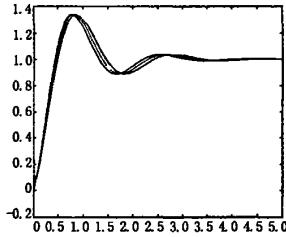


图 9 参数摄动时的阶跃响应结果

Fig. 9 The results of step response with parameter perturbation

由图 9 可以看出,在模型摄动时,系统的阶跃响应结果差异不大,超调和调节时间基本一致,说明所设计

的控制系统对系统模型摄动具有一定的适应能力。

3 结论

本文应用 QFT 理论,对经辨识后得到的某天线稳定平台跟踪装置带有参数不确定性的模型进行鲁棒控制设计,设计出了满足给定鲁棒性能指标的控制器。仿真结果证明了这种 QFT 鲁棒控制器能较好地满足系统动态性能的要求,具备抗模型摄动的能力。

参 考 文 献

- [1] 姜世洲,洪华杰,纪明,等.基于 QFT 的光电稳定控制系统设计与分析[J].应用光学,2009,30(3):377-381.
- [2] HAESSIG D, DECOTIIS J. Modern control methods applied to a line-of-sight stabilization and tracking system [C]//IEEE Proceedings of the American Control Conference, 1987, 6:1491-1498.
- [3] 唐京珊.定量反馈理论及其在卫星姿态控制系统中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
- [4] 李中健,安锦文.基于 QFT 的鲁棒飞行控制器设计[J].飞行力学,2000,18(4):37-40.
- [5] 张庆振. QFT/TECS 在飞机自动着陆控制中的应用研究[D].西安:西北工业大学,2004.
- [6] 晋严尊,杨一栋.空空导弹自适应飞控系统的定量反馈理论设计[J].南京航空航天大学学报,2001,33(1):86-90.
- [7] 王继东.移动载体稳定跟踪平台测控关键技术研究[D].长沙:国防科技大学,2003.
- [8] 韦巍,吴树范.定量反馈理论在鲁棒与容错飞行控制系统中的应用[J].南京航空航天大学学报,2001(2):130-134.
- [9] 肖永利,张琛.定量反馈理论(QFT)及其设计应用[J].信息与控制,1999(6):437-445.
- [10] YANIV O. Quantitative feedback design of linear and nonlinear control systems [M]. Kluwer Academic Publishers, 1999.

(上接第 82 页)

- proportion[J]. Control and Decision, 2004, 19(12):1387-1390.
- [5] HAENNI R. Are alternatives to Dempster's rule of combination real alternatives: comments on "about the belief function combination and the conflict management prob-

lem"[J]. Information Fusion, 2002, 3(4):237-239.

- [6] MURPHY C. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29:1-9.
- [7] 蓝金辉,马宝华. D-S 证据理论数据融合方法在目标识别中的应用[J].清华大学学报,2001,41(2):53-55.

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>