

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.09.015

基于 QFT 的直升机全包线姿态控制器设计

邵康敏, 周鑫

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对飞行包线上对象数学模型的大范围变化所带来的系统不确定问题, 提出基于定量反馈理论 (quantitative feedback theory, QFT) 的直升机全包线姿态控制器设计方案。讨论了运用 QFT 设计多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 系统控制器的原理及一般设计过程, 并采用该理论设计 UH-60 直升机在 6 种飞行状态下的全包线姿态控制器。结果证明: QFT 能够解决由于模型参数不确定性所造成的控制系统鲁棒性问题, 而且具有较强的工程应用价值。

关键词: 直升机; 定量反馈理论; 鲁棒控制; 飞行姿态控制

中图分类号: TP342⁺.3 **文献标志码:** A

Helicopter Full Envelope Attitude Controller Design Based on QFT

Shao Kangmin, Zhou Xin

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Helicopter full envelop attitude controller based on quantitative feedback theory (QFT) is proposed in this paper for solving the problem of system uncertainties due to the wide rage variations of mathematical models of helicopter in the flight envelop. This paper firstly gives a review and discussion of the principles and basic design procedure of QFT for multiple-input multiple-output (MIMO) system, and then applies QFT for the full envelop attitude control of UH-60 with 6 different flight statuses. The research results show that QFT method can successfully resolve the robust problem of flight control system in the presence of model parameter uncertainties, and also show that this method has good engineering applicability.

Keywords: helicopter; QFT; robust control; flight attitude control

0 引言

在飞控系统中, 被控对象(如直升机等)往往是非常复杂的多输入多输出系统, 具体表现为非线性、时变、高度耦合、高阶、不稳定、模型不确定性等。控制器的设计通常基于线性化模型。然而, 各个配平状态下的线性模型差异性非常大, 因而给设计一个覆盖整个飞行包线的控制器带来很大的难度。

目前, 国内外设计全包线控制器一般有以下几种方法: 增益调度 (gain scheduling, GS)^[1-3]、非线性动态逆 (non-linear dynamic inversion, NLDI)^[4]、定量反馈理论 (quantitative feedback theory, QFT)^[5-7]、自适应控制 (adaptive control, AC)^[8]等。其中, QFT 方法由于其优良的鲁棒性能和方便的工程应用受到了广泛的关注。文献[7]采用了 H_∞ 回路成形和 QFT 相结合的设计方法应用于直升机全包线 (0~100 节) 控制器的设计, 虽然利用 H_∞ 回路成形的鲁棒性和解耦效果简化了 QFT 的设计过程, 但是其控制效果还有待提高。因此, 笔者采用 QFT 方

法设计直升机全包线的姿态控制器, 在飞行速度 0~140 节的情况下用仿真进行了验证。

1 MIMO 系统的 QFT 控制器设计过程

定量反馈理论是以色列 Horowitz 教授提出的一种强鲁棒控制理论^[9], 当对象具有不确定性和存在干扰的情况下, 可利用反馈信息设计出满足一定要求的控制系统。MIMO 系统的 QFT 控制结构如图 1, 其中 $G(s)$ 是控制器的传递函数阵, $P(s)$ 是不确定对象传递函数阵, $F(s)$ 是前置滤波器的传递函数阵。MIMO 系统 QFT 设计的关键就是如何有效地将原控制系统转化成一组等效的 MISO 系统, 从而运用相对成熟的 SISO 系统 QFT 设计进行分析, 这也是 MIMO 系统 QFT 设计与 SISO 系统 QFT 设计相比较的最大特点。

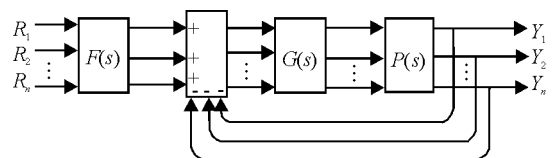


图 1 MIMO 系统的 QFT 控制结构

收稿日期: 2011-05-16; 修回日期: 2011-06-16

基金项目: 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目 (V1090-031)

作者简介: 邵康敏 (1985—), 男, 浙江人, 硕士研究生, 从事直升机飞行控制研究。

总体上说, MIMO 系统的 QFT 控制器设计过程有几个关键步骤:

1) $n \times n$ 的 MIMO 系统到 n^2 个 MISO 系统等效。对于 MIMO 系统来说, QFT 的设计思想是采用纯数学的变换方法对 $n \times n$ (如果不是, 先转成 $n \times n$) 的 MIMO 原系统等效分解成一组 MISO 系统。对于产生的 n^2 个等效子系统, 每个子系统都有 2 个输入, 1 个输出。2 个输入分别是指令输入和“干扰”输入。子系统之间的相互耦合作用在各个子系统中就是作为“干扰”出现的。在完成等效后, 便可以用 SISO 系统的 QFT 技术对各个子系统分别单独设计, 最后综合它们的解便是原系统 MIMO 的解。如图 1 所示, 设 $n \times n$ 的 MIMO 系统的闭环传递函数为

$$T = [I + PG]^{-1} PGF \quad (1)$$

设 P^{-1} 存在且 G 为对角阵, 由式 (1) 可推导得到

$$[I + G^{-1}P^{-1}]^{-1} T = F \quad (2)$$

取 $P^{-1} = [p_{ij}] = [1/q_{ij}]$, 则 T 中的元素可表示成

$$t_{ij} = \frac{q_{ii}}{1 + g_i q_{ii}} [g_i f_{ij} + c_{ij}] \quad (3)$$

其中 $c_{ij} = -\sum_{a \neq i} \frac{t_{aj}}{q_{ia}}$ 。不难看出, 式 (3) 的前半部

是标准的 SISO 闭环系统形式, 后半部分是其他子系统对本回路的耦合作用, 即“干扰”。例如, 对 2×2 的 MIMO 系统, 可以等效成一组子系统, 见图 2。

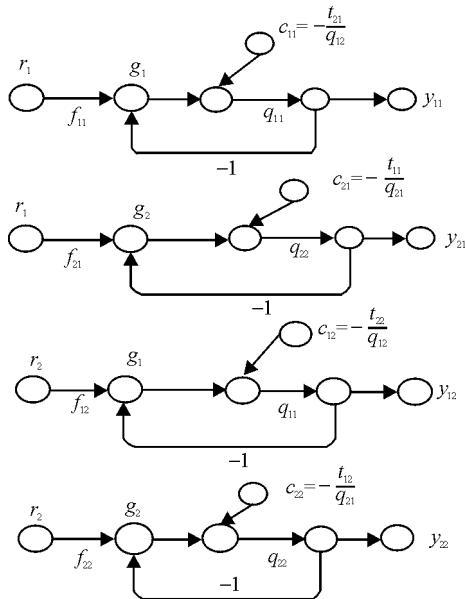


图 2 2×2 MIMO 系统的 MISO 系统等效

2) 选择合适的频率点集 $\{w_i\}$ 。设计前, 首先要

选择一组有代表性的频率集, 以便进行以后的模板和边界计算。在选择时既要顾及准确性, 也要考虑计算量, 频率点的个数不易过多。

3) 生成对象模板、选择标称对象。对象模板描述了被控对象的不确定性范围, 而标称对象是从不确定性对象模型集中任意选择的, 用于生成性能边界及合成控制器。

4) 性能边界的设计和绘制。设计思想是: 把闭环系统的设计要求转化到尼柯尔斯 (Nichols) 图上的一系列约束边界, 进而设计出满足边界条件的控制器来。性能边界主要包括鲁棒稳定性边界、跟踪边界和抗干扰边界。根据性能指标确定系统的鲁棒稳定性边界、跟踪边界和抗干扰边界后, 还要取这些边界在每个频率点 w_i 处的交集, 形成复合边界。该复合边界可以由 QFT 工具箱软件自动形成。

5) 控制器 G 及前置滤波器 F 的设计。经过以上几步得到在 Nichols 图上的复合边界后, 接下来就要设计控制器 G , 这个设计过程也叫整形过程 (looping shaping)。在 Nichols 图上通过加入零极点和增益调整标称对象的开环频率响应曲线, 满足复合边界的要求, 从而得到控制器 G 。在绘有复合边界的 Nichols 图上做出基准对象的开环频率响应曲线, 可以通过加入零点、极点和增益调整曲线的形状和位置, 使得最后开环频率响应曲线在所选择的设计频率点处的位置位于对应频率点的边界的上方, 而且离边界越近越好, 在高频处, 应保证不能进入鲁棒稳定性边界的封闭区域。当开环频率响应曲线满足边界要求后, 这些用来调整形状和位置的零极点和增益就是控制器 G 的表达式。

控制器 G 主要抑制闭环系统的不确定性和扰动, 使闭环频率响应变化量不大于允许的变化范围, 但不能保证闭环频率响应满足跟踪边界要求。因此, 前置滤波器 F 的作用就是调整系统的跟踪性能, 使闭环响应曲线满足期望的闭环输入输出特性。

2 基于 QFT 的直升机全包线设计

文中的被控对象即 UH-60 直升机的不确定性数学模型是已知的, 分别是 0 节、20 节、40 节、60 节、100 节及 140 节条件下的模型^[10]。选择直升机在 0 节的线性模型为标称对象, 在此基础上, 分别设计姿态回路 (滚转角 ϕ 、俯仰角 θ 、垂向速率 w 和偏航角速率 r) 的控制器, 其中, 纵向周期变距对应

于俯仰姿态角, 横向周期变距对应于滚转姿态角, 总距对应于垂向速度, 脚蹬对应于偏航角速率, 使设计完成的控制器适用于全包线范围内的所有模型, 并达到一定的性能要求。下面给出这些性能指标的具体传递函数型式或常值型式。

2.1 鲁棒稳定性性能

$$\left| \frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)P(j\omega)} \right| \leq 1.2, \forall \omega \in [0, \infty]$$

它保证闭环系统最小幅值裕度为 1.8 dB, 最小相位裕度为 45°。

2.2 跟踪性能

跟踪性能指标保证了闭环系统阶跃响应曲线在上下跟踪边界之内, 即满足以下式子:

$$T_L(j\omega) \leq T(j\omega) \leq T_U(j\omega)$$

其中 $T_L(j\omega)$ 和 $T_U(j\omega)$ 分别是上下界。这里的上下界是由时域指标转化而来, 保证系统满足相应的超调量不大于 48%、调整时间不超过 3 s。各通道的跟踪性能指标要求见表 1, 表中 $[\xi; \omega]$ 代表

$$\left(\frac{s^2}{\omega^2} + \frac{2\xi s}{\omega} + 1 \right), (\omega) \text{ 代表 } (s/\omega)。$$

表 1 各通道的跟踪性能指标

垂向通道	滚转通道	俯仰通道	偏航通道
$T_L = \frac{0.9}{(4)(1)}$	$T_L = \frac{0.9}{(3.5)[0.7; 4.5](10)}$	$T_L = \frac{0.9}{(2)[0.7; 2.6](6)}$	$T_L = \frac{0.9}{(3.5)[0.7; 4.5](10)}$
$T_U = \frac{1.11}{(2)}$	$T_U = \frac{1.11(5)}{[0.4; 3.5](10)}$	$T_U = \frac{1.11(2.9)}{[0.4; 2](6)}$	$T_U = \frac{1.11(5)}{[0.4; 3.5](10)}$

2.3 抗干扰性指标

抗干扰指标包括抗输入干扰指标和抗输出干扰指标。为满足抗干扰性指标要求应该满足一定条件:

$$\begin{cases} \frac{P(j\omega)}{1+G(j\omega)P(j\omega)} \leq B_{d1}(j\omega) \\ \frac{1}{1+G(j\omega)P(j\omega)} \leq B_{d2}(j\omega) \end{cases}$$

这些指标通常限定在一定的范围内, 且与干扰源的特点密切相关, 还直接影响到闭环系统的带宽。在设计过程中, 考虑到在满足条件的情况下, 应使系统的带宽不能太大, 不然不利于系统的稳定性。

表 2 抗干扰要求

第 1 组回路	第 2 组回路	第 3 组回路	第 4 组回路
$ q_{11} / (1+q_{11}G_1) \leq 0.15$	$ q_{22} / (1+q_{22}G_2) \leq 0.08$	$ q_{33} / (1+q_{33}G_3) \leq 0.1$	$ q_{44} / (1+q_{44}G_4) \leq 0.3$

选取一组频率点, 分别是 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, 40, 80 rad/s。在每一频率点处, 对每一组回路中的不确定性模型进行计算并绘制出对象模板, 然后在此基础上绘制出相应的鲁棒稳定性边界、跟踪边界、抗干扰边界所形成的复合性能边界, 在此基础上对每一组回路设计控制器。

2.4 仿真验证

仿真结果如图 3, 令垂向速率指令、滚转角指令、俯仰角指令和偏航速率指令同时为单位阶跃输入, 分别观察在 0 节、20 节、40 节、60 节、100 节及 140 节数学模型下的单位阶跃响应曲线。其中,

由于 MIMO 系统等效为一组 MISO 子系统后, 每个子系统本质上可看成是 SISO 系统, 只不过多了一个“干扰”输入, 所以必须设计抗“干扰”指标来抑制各个子系统之间的相互影响。因为“干扰”源属于输入端干扰, 故笔者只设计输入端的抗干扰指标。4×4 的 MIMO 系统等效为 16 个 MISO 子系统, 在这 16 个子系统中, 每 4 个子系统都有相同的控制器和被控对象, 将它们放在一组。然后, 对每一组 (4 个子系统) 设计一个抗干扰指标, 见表 2。表 2 中, 等式左边表示传递函数的模值, 通过事先给定一组频率点, 就可以得到每个频率点下的值。

图 3 中虚线为上下界跟踪性能指标所对应的单位阶跃响应曲线, 实线代表被控对象为不同模型时的闭环单位阶跃响应曲线。从图 3 的仿真结果可以看出: 四通道有良好的解耦性和信号跟踪能力。另外每个子图都有 6 条实线, 分别表示了在不同模型时其对应的闭环单位阶跃响应, 从图 3 中可以看出不同模型的单位阶跃响应曲线非常接近, 这也验证了即使在对象的数学模型存在较大的差异时, 采用 QFT 方法设计的控制器也能保证整个控制系统的鲁棒性和较为一致的响应行为。