

定量反馈理论发展综述

王增会, 陈增强, 孙青林, 袁著祉

(南开大学 自动化系, 天津 300071)

摘要: 定量反馈理论是一种基于频域的鲁棒控制理论, 可以用于具有高度不确定性的单变量线性/非线性系统、多变量线性/非线性系统控制器设计. 本文概述了定量反馈理论的基本原理、设计过程以及特点. 总结了近年来 QFT 在提高系统性能、鲁棒稳定性、自动设计以及应用等方面的最新研究进展, 并且给出了一些已有的理论应用成果. 最后讨论了进一步的研究方向.

关键词: 定量反馈理论; 鲁棒控制; 不确定系统; 频率域; 多变量系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Survey of the development for quantitative feedback theory

WANG Zeng-hui, CHEN Zeng-qiang, SUN Qing-lin, YUAN Zhu-zhi

(Department of Automation, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Quantitative feedback theory (QFT) is a robust control theory based on frequency domain. It can be used to control single variable linear/nonlinear and multivariable linear/nonlinear systems with high uncertainty. In this paper, the basic theory, designing process and characteristic of QFT are described. The development of QFT is then summarized in several fields: increasing performance, robust stability research, automatic design and its applications. Some theory results are also given. Finally, the future development is discussed.

Key words: quantitative feedback theory (QFT); robust control; uncertain system; frequency domain; multivariable system

1 引言 (Introduction)

定量反馈理论 (quantitative feedback theory, QFT) 是 Horowitz 教授在 1959 年提出的一种鲁棒控制器设计理论^[1~3]. QFT 与状态空间理论产生于同一时期, 在 20 世纪 60 年代末基本理论已经形成. 但是由于该理论是基于频率域 Nichols 图分析来设计控制器, 需要大量的计算和图形分析, 从而在很长的一段时间没有得到重视. 进入 90 年代, 由于计算机的迅速发展和各种 CAD 工具包的出现, 使得 QFT 在这方面的限制很大程度地得到缓解. 从而使得“QFT 成为 20 世纪 90 年代一项令人振奋的新技术”^[4].

QFT 是一种鲁棒控制器的设计理论, 在设计控制器之前把系统的各种不确定性和需要达到的性能指标以定量的形式描述出来, 然后根据这些限定, 设计可以容忍这些不确定性并且满足性能指标的控制, 从而使得到的控制器具有很好的鲁棒性. 与其它

鲁棒控制理论相比有以下优点: 可以定量地估计反馈的代价 (即由于系统不确定性而决定的开环传递函数的带宽); 在设计中可以考虑相位信息, 而那些基于范数的鲁棒控制理论则不能; 在设计过程中可以直观地权衡控制器复杂性与性能指标.

QFT 是一种针对具有高度不确定性反馈控制系统的工程设计理论, 是用作图的方法把设计指标和系统的不确定性用定量的方法在 Nichols 图上形成边界, 然后基于这些边界设计满足要求的控制器 (包括前置滤波器). QFT 可以应用于各种控制系统: 1) 高度不确定性的线性时变单输入单输出 (SISO) 和多输入多输出 (MIMO) 系统; 2) 非线性时变的 SISO 和 MIMO 系统; 3) 具有单回路或者多回路的高频振荡系统, 非最小相位的 MIMO 系统; 4) 具有高度非线性 (如饱和) 环节的线性时不变系统 (LTI).

2 QFT 基本原理及设计过程 (Basic theory and designing process of QFT)

QFT 是针对控制对象结构不确定和存在干扰的情况下,基于频域理论利用反馈信息,设计出具有很好鲁棒性的控制器的理论.由于 Horowitz 用 Schouder 定点理论分析了 MIMO、非最小相位、时变以及非线性等系统可以与多个 LTI SISO 系统等效^[5],因此单回路 LTI QFT 是整个 QFT 体系的基础.在这里就以 LTI SISO 系统为对象介绍 QFT 的基本原理和设计过程.

QFT 设计包括闭环回路控制器 C 和前置滤波控制器 F 两部分,其基本结构如图 1 所示.其中 P 为具有参数或结构不确定的系统, d_1 和 d_2 为外部干扰, R 为参考输入, Y 为系统输出.

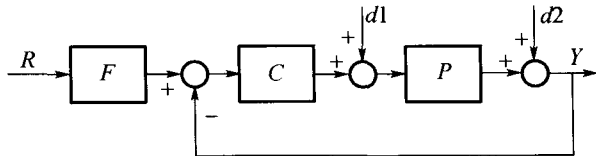


图 1 SISO QFT 控制器结构

Fig. 1 SISO QFT Controller diagram

对于具有不确定性的被控对象可以由一个线性传递函数集合 ϑ 来表示:

$$\vartheta = \{P(s) = \sum a_i s^i / \sum b_j s^j : [a_i, b_j] \in \Delta\}$$

其中 $[a_i, b_j] \in \Delta$ 表示系统参数 a_i, b_j 在一定范围具有不确定性.

设计目标是设计控制器使得具有不确定性的系统稳定并且达到一定的性能要求,一般的闭环性能指标有:

i) 跟踪性能指标

$$\forall P(j\omega) \in \vartheta, T_d(\omega) \leq \left| F(j\omega) \frac{C(j\omega)P(j\omega)}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \leq T_u(\omega), \quad (1)$$

其中 $T_d(\omega)$ 和 $T_u(\omega)$ 分别为闭环频率的下界和上界函数.

ii) 鲁棒稳定裕度指标

$$\forall P(j\omega) \in \vartheta, \left| \frac{C(j\omega)P(j\omega)}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \leq M_0, \quad (2)$$

M_0 为闭环系统准许的最大谐振幅值,对应于 Nichols 图上的一条等 M 圆曲线.

iii) 输入干扰抑制指标

$$\forall P(j\omega) \in \vartheta, \left| \frac{P(j\omega)}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \leq W_1(\omega), \quad (3)$$

iv) 输出干扰抑制指标

$$\forall P(j\omega) \in \vartheta, \left| \frac{1}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \leq W_2(\omega). \quad (4)$$

2.1 对象模板和标称对象 (Plant template and nominal plant)

对象模板 (plant template) 是用于描述被控对象在某一频率点的不确定性范围,在 Nichols 图上是一个区域.可以根据系统对频率特性的要求选取多个频率点,从而得到不同频率点反映系统不确定性的多个模板.通常选取那些可以表征系统最大范围不确定性的频率点来生成模板.生成模板的方法也有多种方法^[6],一般模板越大,系统的不确定性就越大.

由于被控对象具有不确定性,为了设计控制器还需要一个基准对象,在 QFT 中称为标称模型 (nominal plant).原则上标称模型可以选取集合 ϑ 中的任意函数,但是为了获得较好的控制性能,一般选取极端情况下的被控对象作为标称模型.

2.2 确定频率边界 (Fix the frequency bound)

有了对象模板和选取了标称模型就可以在 Nichols 图上根据性能要求,设定频率边界.然后根据所有的频率边界得到复合的频率边界.

如对于跟踪要求 (1),由于整个闭环传递函数为

$$T(s) = F(s) \frac{L(s)}{1 + L(s)}, \quad (5)$$

其中 $L(s) = C(s)P(s)$, 为开环传递函数.

$T(s)$ 的不确定性只取决于 $L(s)$ 的不确定性,从而

$$\Delta 20 \log |T(j\omega)| = \Delta 20 \log \left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right|. \quad (6)$$

由 (1) 可得

$$\begin{aligned} \Delta 20 \log |T(j\omega)| &= \Delta 20 \log \left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \\ \Delta 20 \log |T_u(\omega)| - \Delta 20 \log |T_d(\omega)| &= \Delta T_{\max}(\omega). \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\Delta T_{\max}(\omega)$ 为跟踪性能上、下限的常用对数的差值.

根据 Nichols 图的性质知,只需要水平移动 (为 $C(s)$ 的相位) 和垂直移动 (为 $C(s)$ 的幅值) 对象模板就可以将对象模板放到两条等 M 线之间,当两条等 M 线的差值等于 $T_{\max}(\omega)$ 时就可以保证 $T(j\omega)$ 的变化小于不同频率点的设定值.因此只要模板在某个相位上上下移动就可以得到满足要求的位置,然后在 Nichols 图上标出标称模型所在位置.选取不同

的相位并且重复移动模板,就可以在 Nichols 图上描出对标称模型开环频率相对应的跟踪边界曲线. 同样,根据其他性能指标可以在 Nichols 图上得到其他的限定边界.

2.3 设计控制器(Design the controller)

在 Nichols 图上做出标称模型的开环频率响应曲线,为了得到期望的性能要求需要增加零极点来调整曲线的形状. 根据文[7~9],如果存在控制器,那么最优的控制器将使得标称开环传递函数频率响应图形在每一个频率点都在边界上. 因此整形后的开环频率响应曲线应在边界上方,并且应尽可能与边界靠拢,在高频段也不应该与稳定边界相交. 通过求取鲁棒稳定边界,可知整形的过程就是设计控制器的过程. 控制器的作用是抑制闭环回路不确定性及扰动,并不一定保证闭环系统满足跟踪性能要求,因此还需要前置滤波器调整系统的整体频率响应.

通常设计控制器需要反复调试才能成功,由实现过程可知 $C(s)$ 和 $F(s)$ 并不是唯一的,这就需要根据实际情况和具体额外要求选择合适的控制器.

2.4 对其它类型系统的定量反馈设计(QFT for other system structures)

高度非线性(时变)SISO 的 QFT 设计原理是把非线性对象的集合 $W = \{w\}$ 等价成一个 LTI 对象集合 $\vartheta = \{p\}$,然后在对这个 LTI 集合上进行 QFT 设计^[10,11]. ϑ 必须在所期望的系统输出集合 $A\{a\}$ 内与 W 等价. 即从 W, A 中取出任意元素 w_i 和 a_j , 可以找到一个系统输入 x_{ij} 使得 w_i 有输出 a_j , 记为 $a_j = w_i(x_{ij})$; 那么 ϑ 中一定要存在一个 p_{ij} , 使得 $a_j = p_{ij}(x_{ij})$. 设 $p_{ij}(s) = \tilde{a}_j(s)/\tilde{x}_{ij}(s)$, 其中 $\tilde{a}_j(s)$ 和 $\tilde{x}_{ij}(s)$ 分别为 $a_j(t)$ 和 $x_{ij}(t)$ 的 Laplace 变换. 重复 i, j 就可以得到等价的 LTI 的 ϑ ^[12]. 文[2]给出了两个集合是等价的证明. 一旦得到了等价的 LTI 对象集,就可以在 ϑ 上用前面的 QFT 进行分析设计,而不需要再考虑非线性系统.

随着时间的推移,非线性 SISO QFT 也得到非常大的扩展与提高. 根据前面的理论可以看出,一个非线性系统可以由无限个 LTI 对象的集合等价,这就可能出现过度设计(使得系统几乎完全确定,从而设计复杂度提高并且显示不出 QFT 的优点)的问题,文[13]给出了非线性补偿器来改善这方面的缺陷. 对于 QFT 只是局限于最小相位系统的问题,文[14]把非线性的 QFT 扩展到了有界输入的情况. 文[15]把 QFT 从理论上扩展到了有无限个输入集的情况.

线性 MIMO 系统的 QFT 设计方法的基本原理是把 MIMO 的系统转化为等价的 MISO 的系统然后再进行 QFT 设计^[16~18]. 在进行 MIMO QFT 设计时首先必须保证被控对象的输入、输出变量个数相同并且为最小相位系统^[19]. 否则,需要选取合适的权值矩阵 W 来保证等效的被控对象 $P = P'W$ 输入、输出变量个数相同并且满秩. 整个控制系统的结构如图2所示.

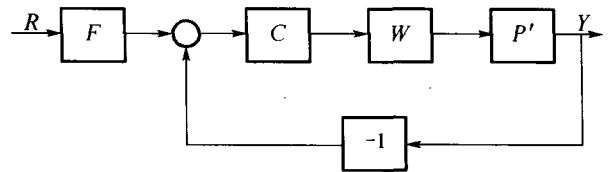


图2 MIMO QFT 系统结构

Fig. 2 MIMO QFT Controller diagram

由图2可以得到系统的传递函数阵为

$$T = [I + PC]^{-1} PCF. \quad (8)$$

对于有 $n \times n$ 的系统,控制器阵 C 中应该有 $n \times n$ 个子控制器,分析设计将非常复杂. 那么只要能保证系统的性能,就可以对 C 进行简化. 这里定义反馈回路的控制器阵为对角阵

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & c_n \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由(8)可得

$$[I + PC]T = PCF. \quad (10)$$

由于 P 为最小相位,由(10)可以得

$$[P^{-1} + C]T = CF, \quad (11)$$

把 P^{-1} 分解为两部分

$$P^{-1} = A + B, \quad (12)$$

其中: A 为由 P^{-1} 对角线元素组成的对角阵, B 为 P^{-1} 的对线元素为零时的矩阵.

把(12)代入(11),整理可得

$$T = [A + C]^{-1}[CF - BT]. \quad (13)$$

为了便于分析,这里采用被控对象的等效传递函数阵 Q . 由于 P 满秩,所以存在

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} p_{11}^* & p_{12}^* & \cdots & p_{1n}^* \\ p_{21}^* & p_{22}^* & \cdots & p_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1}^* & p_{n2}^* & \cdots & p_{nn}^* \end{bmatrix}. \quad (14)$$

定义 Q 的元素

$$q_{ij} = \frac{1}{p_{ij}^*} = \frac{\det P}{\text{adj } p_{ij}}, \quad (15)$$

从而 T 的元素

$$t_{ij} = w_{ij}[v_{ij} - d_{ij}] \quad (16)$$

$$\text{其中: } w_{ij} = \frac{q_{ii}}{1 + c_i q_{ii}}, \quad v_{ij} = c_i f_{ij}, \quad d_{ij} = \sum_{k=1, k \neq i}^n \frac{k_{ij}}{q_{jk}}$$

文[5]证明了式(13)右边矩阵的每个元素都可以看成一个 MISO 的闭环系统. 对于 2×2 的系统, 由(14)可以得到如图3所示的4个子系统. 把 d_{ij} 看成干扰项, 那么 MISO 系统的 QFT 就转换为了 SISO 系统的 QFT 问题了. 设计目标就可分解为设计控制器矩阵 C 和 F 中的元素, 使得每个回路的干扰最小化的基础上, 使每个回路输出跟踪期望输入.

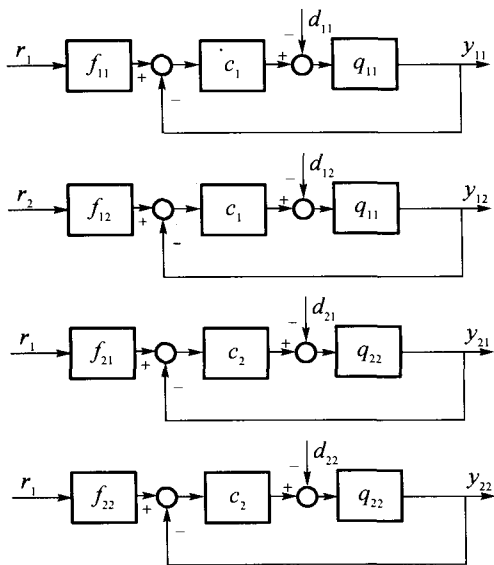


图3 2×2 MISO 等效结构图

Fig. 3 2×2 MISO equivalent diagram

用这种方法设计 QFT 控制器依然比较复杂, 为了进一步简化设计过程, 文[20]将性能指标转化为模型匹配的问题, 文[21]提出了用等价削弱干扰的方法, 文[22]提出了以满足非主通道部分性能的多变量 QFT 的替换结构理论. 虽然这些方法有其不同点, 但是把 MIMO 系统转化为 MISO, 再进行 QFT 设计的思想没有发生根本的改变.

由于 MIMO 的设计过程比较复杂, 如果通过人工进行设计, 这将对设计人员的要求比较高, 并且设计的周期也比较长. 为了更好的应用, 各种 QFT 设计方法的 CAD 软件包也就发展起来了. 在工程中, 用这些 QFT CAD 软件包可以快速、方便地设计出针对具有不确定性系统的控制器^[23].

非线性(时变)MIMO 的系统的 QFT 设计方法就是将非线性 SISO 和 MIMO 的 QFT 设计方法的综合^[24,25]. 对于 n 输入 n 输出的非线性/时变系统, 首先根据输入输出数据, 用非线性 QFT 的方法, 得到与原系统等价的 $n \times n$ 的 MIMO LTI 集合, 然后用

前面提到的 MIMO QFT 设计控制器就可以了.

3 QFT 特点(Characteristics of QFT)

由上面的设计过程可以看出 QFT 主要有以下特点:

- 是一种工程设计方法. 用到比较少的数学工具(只需要频域分析的基本知识)就可以实现 QFT 控制器的设计, 比较容易为工程技术人员掌握.
- 是一种鲁棒设计方法. QFT 可以很好地实现对具有大干扰和不确定性系统控制.
- 对于一些系统, 设计的过程就保证了系统的各种性能, 不需要再对系统进行额外的性能分析.
- 在设计过程中可以方便直观地对控制器复杂性和系统性能要求两者做出折中.
- 可以把时变、非线性等系统等价成线性传递函数的集合, 可以得到固定参数的控制器, 实现起来比较简单.
- 可以应用于结构未知的系统即可以根据试验得到的频率响应数据进行控制器设计.
- 应用范围广, 可以应用于单变量、多变量、非最小相位、时变非线性等控制系统.

4 QFT 主要研究的方向(Main development of QFT)

QFT 作为一种鲁棒控制理论也存在着一些需要完善的地方, 近年来一直在不断的改进和发展. 其研究主要在以下几个方面.

4.1 提高 QFT 性能方面的研究(Improving QFT performance)

虽然 QFT 的基本理论体系在 20 世纪 60 年代末就已经形成, 但是在实现的复杂程度、提高性能以及应用范围等方面都需要进一步的完善与发展. 在近 20 多年里, 以 Horowitz, Yaniv 等为首的学者极大地发展了 QFT.

文[26]给出了基于逆 Nyquist 矩阵对具有高度不确定性的 MIMO 系统进行 QFT 设计的方法. 为了削弱各个通道间的耦合, 文[27]引入了内部反馈回路. QFT 设计是在频域进行的, 所以必须把时域的性能指标转到频域. 许多情况下转换是非常困难的, 文[28]给出了持续有界干扰最大幅值抑制的设计方法, 该方法只需时间响应的上界, 因此可以很容易把时域的常数边界映射到频域内, 但这种方法依然存在边界精确性问题. Horowitz^[29,30]定义了灵敏度传递函数为

$$S_i(s) = \frac{T_i(s) - T_k(s)}{T_k(s)} \bigg/ \frac{L_i(s) - L_k(s)}{L_k(s)} \quad (17)$$

其中: $L(s)$ 为开环传递函数, $T(s)$ 为闭环传递函数. Horowitz 进行分析时假设前置滤波器 $F(s)$ 和反馈回路(测量传感器)是确定的,但是在实际应用中是不可能的.在一定情况下,如果不考虑这些因素可能出现的问题.文[31]把跟踪误差看成设计目标,考虑到前向通道以及反馈通道不确定性的影响在翻转的 Nichols 图(也就是在 Nichols 图上对图形进行一定的变换)上进行控制器设计.该方法灵敏度指标变为标称模型对应的灵敏度指标:

$$|S_h(j\omega)| = \left| \frac{1}{1 + L_h(j\omega)} \right| \leq M_r = \frac{|E_r|_{\max} - |\delta_F|_{\max}}{\left| \frac{P_h(j\omega)}{P_k(j\omega)} - 1 \right|_{\min}} \quad (18)$$

其中: $L_h(j\omega)$, $P_h(j\omega)$ 分别为标称模型的开环传递函数和标称模型, $|E_r|_{\max}$ 为最大误差, δ_F 是由标称模型下前向通路和反馈回路的不确定性决定的.该方法设计的控制器可以使得跟踪误差非常小.

对于把 QFT 与其它控制算法结合起来,也是 QFT 研究的一个热点.文[32]提出把动态前馈补偿与 QFT 结合起来,成为了基于模型的鲁棒控制算法.文[33]提出把最优控制与 QFT 融合的思想,并且把 QFT 与 μ 综合相结合来解决一个普遍的具有鲁棒性约束的问题,显示了非常好的效果.

4.2 鲁棒稳定性研究(Robust stability studying)

MIMO QFT 是应用于处理 MIMO 不确定性系统非常有效的方法,其设计方法主要分为两类:顺序设计和非顺序设计.对于一般的 MIMO QFT 并没有考虑系统的整体稳定性,从而进行整体鲁棒稳定性研究是非常有必要的^[34].

对于 MIMO QFT 的顺序设计又分为对直接对象(direct plant domain, DPD)进行设计和对反转对象(inverse plant domain, IPD)设计.文[35]给出了如果顺序设计的最外回路是稳定的就可以保证连续 DPD 设计的 MIMO 闭环系统是稳定的结论.对于顺序 IPD 的设计方法,1986 年文[36]给出了保证每个回路稳定的综合设计方法,来保证整个系统的稳定性.文[37]直观地阐述了对于两个回路系统而言,第 1 个回路稳定是整个闭环系统稳定的充分条件.1999 年,文[38]证明了对于两个回路的顺序 IPD 设计,第 2 个回路稳定是整个闭环系统稳定的充分条件.2003 年,文[39]给出了顺序 IPD MIMO QFT 鲁棒稳定性的充分必要条件:最外回路稳定.至此,顺序 DPD 与顺序 IPD 的 MIMO QFT 的鲁棒稳定性条

件统一起来了.

对于非顺序的 MIMO QFT,1996 年,文[40]给出了通过增加一个灵敏度条件的方法来保证整个系统的鲁棒稳定性.文[41]给出了一个比文[40]更宽松的灵敏度条件,由于没有明显改变非顺序 MIMO QFT 的设计过程,可以比较容易地实现.

4.3 QFT 自动设计(Automatic design QFT)

最优控制器能使标称开环频率响应曲线的每一个频率点都在限定边界上,但是使得开环传递函数的频率响应曲线完全与复合频率边界相重合的控制器实现起来会非常复杂,因此需要统筹考虑各种因素来设计比较合理的控制器.如果单纯人为地去设计控制器,那么将会对工程人员的经验要求很高.因此,最优 QFT 控制器的自动设计就成了 QFT 研究的一个重要方面.

1980 年,Horowitz 给出了通过反复应用 Bode 积分的方法进行自动整形^[42, 43];文[44]给出了用遗传算法进行整形;上面的这些方法都是基于非线性问题进行优化,但是存在优化过程中的收敛性、初始化以及稳定性等问题,这些都限制了上面方法的应用.其它的一些都是基于线性优化问题进行自动设计的^[45-48].文[48]引进了 Youla 参数把 QFT 的鲁棒性能问题转化到一维寻优,这种方法适合于只有一个参数需要选择的控制器.文[46]给出了对于 SISO 系统,基于两步优化算法的 QFT 闭环自动设计方法.文[47]给出了基于对过度设计惩罚的准则下的定结构的 QFT 控制器的设计方法.2004 年,文[49]给出了基于在控制器稠密集内寻优的方法对 QFT 控制器进行自动整形设计,并给出了 PID 控制器的参数选择的例子,这种方法只适用于有少量边界并且只有两个可变参数的控制器参数选择.文[50]在前文的基础上把两个参数的寻优扩展到多个参数.

4.4 QFT 的应用研究(Application of QFT)

QFT 作为一种鲁棒控制理论,其突出的优点就是非常容易地应用于实际工程中;并且可以根据具体的问题进一步完善 QFT 设计.

QFT 具有很好的鲁棒性,因而被广泛地应用于具有严重不确定性的动力系统中.文[51]把 MIMO QFT 应用于模拟的飞行控制系统并且通过了测试.文[52, 53]给出了用 QFT 对飞机鲁棒飞行控制系统的设计,文[54]用 QFT 设计了存在风、油传送等干扰的情况下,实现对空中加油机的姿态控制,这些都表明了 QFT 在飞机飞行控制的有效性.文[55]用

QFT 设计亚音速飞机的全包络飞行控制系统,并且通过了有人驾驶的情况下飞行系统稳定性的测试,表明了 QFT 可以用于结构已知具有大的不确定性的飞机的全包络飞行控制,并且可以在物理上实现;文[56]给出了无人驾驶探测飞机从控制系统设计到试飞的全过程描述,表明 QFT 用于鲁棒飞行控制设计的优越性和可实现性.文[57]给出了用于控制飞机发动机的方法,实验结果证明可以获得比过去其它控制器更好的性能.文[58]用 QFT 控制内燃机并且通过了实验验证,表明了用等价的线性不确定模型通过 QFT 去控制非线性系统的有效性和可实现性.

QFT 可以很好地对具有不确定性的系统进行控制,因此 QFT 可以用于各种系统的容错控制.文[59~61]把 QFT 用于飞行控制系统,以处理当控制面板出现损坏时对系统进行可靠的控制.文[62]把 QFT 用于电液控制器,当传感器或者伺服阀出现故障时,可以保证系统的稳定运行;实验表明当电液控制器出现问题时系统具有高度的容错能力.文[63]把 QFT 用于伺服液压位置控制器,实验证明当活塞出现漏泄时,QFT 在保证伺服液压位置控制器稳定性基础上满足其跟踪性能.

为了控制燃料注射机的空载转速,文[64]提出了并行结构的 QFT 设计方法,表明了 QFT 设计所具有的重要特征:可以用硬件对带宽进行限制,可以处理执行器的饱和等时域内的硬约束.文[65]给出了用 QFT 设计存在外在干扰并且技术指标高度不确定的 CD 机控制器,根据研究提出了与实现顺序对象反转理论相同的顺序对象控制方法.

5 结论与展望(Conclusions and prospects)

QFT 作为一种从工程应用角度提出来的鲁棒控制理论,建立起工程应用与理论研究的桥梁.由于其所具有的优越性,QFT 被应用于各种控制系统.经过四十多年的发展,QFT 从理论研究到应用各个方面都取得了非常大的成就,成为现代频域控制理论的重要组成部分.但是理论和应用很多地方需要发展完善.

1) 改进 QFT 控制算法,使 QFT 控制效果更好、应用更广,特别是简化 QFT 的控制算法和改进多变量 QFT.

2) 对于 QFT 的鲁棒稳定性的研究,特别是对于多变量、非线性和时变系统鲁棒稳定性的研究,进一步完善 QFT 的数学理论基础.

3) 把 QFT 与其它理论^[66~69]结合在一起,以取

得更好的控制性能.

4) 研究 QFT 自动设计理论,缩短设计 QFT 控制器周期,并且降低 QFT 控制器设计的难度.

5) 将 QFT 用于实际的工程^[70]中,根据需要改进 QFT,从而推动 QFT 的发展;充分发挥 QFT 工程应用的优越性.

参考文献(References):

- [1] HOROWITZ I. Quantitative feedback theory [J]. *IEEE Proceedings*, 1982, 129(6):215-226.
- [2] HOROWITZ I. Survey of Quantitative feedback theory (QFT) [J]. *Int J Control*, 1991, 53(2):255-291.
- [3] HOROWITZ I. A synthesis for linear feedback systems with large plan ignorance for prescribed time-domain tolerances [J]. *Int J Control*, 1972, 16(2):287-309.
- [4] HOUPIS C H. Editorial [J]. *Int J Robust Nonlinear Control*, 1997, 7(6):513-514.
- [5] HOROWITZ I. Quantitative synthesis of uncertain multi-input-output feedback systems [J]. *Int J Control*, 1979, 30(1):81-106.
- [6] BALLANCE D J, HUGHES G. A survey of template generation methods for quantitative feedback theory [C]// *The United Kingdom Automatic Control Council International Conference on Control* 1996. Exeter, England: IEE Conference Publication, 1996, 427: 172-174.
- [7] HOROWITZ I. Optimum loop transfer function on single-loop minimum-phase feedback system [J]. *Int J Control*, 1973, 18(1):97-113.
- [8] HOROWITZ I, SIDI M. Optimum synthesis of non-minimum phase feedback systems with plant uncertainty [J]. *Int J Control*, 1973, 18(3):361-386.
- [9] GERA A, HOROWITZ I. Optimization of the loop transfer function [J]. *Int J Control*, 1980, 31(2):389-398.
- [10] HOROWITZ I. A synthesis theory for linear time-varying feedback systems with plant uncertainty [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1975, 20(4):454-463.
- [11] HOROWITZ I. Synthesis of feedback systems with non-linear time-varying uncertain plants to satisfy quantitative performance specifications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1976, 64(1):123-130.
- [12] GOLUBEV B, HOROWITZ I. Plant rational transfer approximation from input-output data [J]. *Int J Control*, 1982, 36(4):711-723.
- [13] HOROWITZ I. Improvement in quantitative nonlinear feedback design by cancellation [J]. *Int J Control*, 1981, 34(3):547-560.
- [14] HOROWITZ I. Quantitative synthesis of uncertain nonlinear feedback systems with nonminimum-phase inputs [J]. *Int J of system Sciences*, 1981, 12(1):56-76.
- [15] HOROWITZ I. Feedback systems with nonlinear uncertain plants [J]. *Int J Control*, 1982, 36(1):155-171.

- [16] HOROWITZ I, SIDI M. Practical design of multivariable feedback systems with large plant uncertainty [J]. *Int J of System Sciences*, 1980, 11(7): 851–875.
- [17] HOROWITZ I, LOECHER C. Design of a 3×3 multivariable feedback system with large plant uncertainty [J]. *Int J Control*, 1981, 33(4): 677–699.
- [18] HOROWITZ I. Improved design technique for uncertain multiple-input multiple-output feedback system [J]. *Int J Control*, 1982, 36(6): 977–988.
- [19] HOUPIS C H, PACHTER M. Application of QFT to control system design—An outline for engineers [J]. *Int J Robust Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 515–531.
- [20] YANIV O, CHAIT Y. A simplified multi-input multi-output formulation for the quantitative feedback theory [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1992, 114(1): 179–185.
- [21] CHIEN C M, WANG B C, HOROWITZ I. An alternative method for the design of MIMO system with large plant uncertainty [J]. *Control Theory and Advanced Technology*, 1993, 9(4): 955–969.
- [22] CHENG C C, LIAO Y K, WANG T S. Quantitative feedback design of uncertain multivariable control systems [J]. *Int J Control*, 1996, 65(3): 537–553.
- [23] HOUPIS C H, SATING R R. MIMO QFT CAD package [J]. *Int J Robust Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 533–549.
- [24] HOROWITZ I, BREINER M. Quantitative synthesis of feedback system with uncertain nonlinear multivariable plants [J]. *Int J System Sciences*, 1981, 12(5): 539–563.
- [25] BOSSERT DAVID E, LAMONT GARY B, MICHAEL B, et al. Model-based control with quantitative feedback theory: empirical mode analysis [C]// *Proc of the 28th Conference on Decision and Control*. Honolulu, Hawaii: IEEE Press, 1990: 1974–1975.
- [26] NWOKAH O D I, NORDGREN R E, GREWAL G S. Inverse nyquist array: a quantitative theory [J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 1995, 142(1): 23–30.
- [27] CHENG C C, LIAO Y K, WANG T S. Quantitative design of uncertain multivariable control system with an inner-feedback loop [J]. *IEEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 1997, 144(2): 195–201.
- [28] JAYASURIYA S, FRANCHEK M A. Frequency domain design for maximal rejection of persistent bounded disturbances [J]. *J of Dynamic systems, Measurement and Control*, 1991, 113(2): 195–205.
- [29] HOROWITZ I. *Synthesis of Feedback Systems* [M]. New York, American: Academic Press, 1963.
- [30] HOROWITZ I. *Quantitative Feedback Design Theory (QFT)* [M]. Boulder, American: QFT Publications, 1993.
- [31] EDUARD E. Quantitative feedback design for tracking error tolerance [J]. *Automatica*, 2000, 36(2): 319–326.
- [32] BOSSERT, DAVID E, GARY B, et al. Model-based control with quantitative feedback theory [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Robot and Auto*, Cincinnati, OH: IEEE Press, 1990: 2058–2063.
- [33] LEE J W, CHAIT YOSS, STEIBUCH M. On QFT tuning of multivariable μ controllers [J]. *Automatica*, 2000, 36(11): 1701–1708.
- [34] ZHAO Y, JAYASURIYA S. Robust stabilization of uncertain systems with parametric uncertainties [C]// *Proc 12th IFAC Conf on Word Congress*, Sydney, Australia: IFAC Press, 1993, 6: 31–34.
- [35] ROSENBROCK H H. The stability of multivariable systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1972, 17(1): 105–107.
- [36] YANIV O, HOROWITZ I. A quantitative design method for MIMO linear feedback systems having uncertain plants [J]. *Int J Control*, 1986, 43(2): 401–421.
- [37] YANIV O, HOROWITZ I. Quantitative feedback theory—reply to Doyle's criticisms [J]. *Int J Control*, 1987, 46(3): 945–962.
- [38] YANIV O. *Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems* [M]. Norwell, Kluwer: Academic Publishers, 1999.
- [39] MURRAY K, SUHADA J S, SAMUEL A. Robust stability in sequential MIMO QFT [C]// *Proc of the American Control Conference*. Denver, Colorado: IEEE Press, 2003: 4834–4839.
- [40] ZHAO Y, JAYASURIYA S. Robust stability of closed loop systems resulting from non-sequential MIMO-QFT design [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1996, 118(4): 753–756.
- [41] MURRAY K, SUHADA J. Sufficient conditions for stability in non-sequential MIMO QFT [C]// *Proc of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*. Maui, Hawaii: IEEE Press, 2003, 2: 1813–1817.
- [42] HOROWITZ I, GERA A. Optimization of the loop transfer function [J]. *Int J Control*, 1980, 31(2): 389–398.
- [43] BALLECE D J, GAWTHROP P J. Control systems design via quantitative feedback theory approach [C]// *Proc of the IEE Conference on Control'91*. Heriot-watt University, Edinburgh, U K: IEE Press, 1991, 1: 476–480.
- [44] BALLANCE D J, CHEN W. Symbolic computation in value sets of plans with uncertain parameters [J]. *J of Engineering and Applied Science*, 1998, 455(2): 1322–1327.
- [45] VINCENT C, EMMANUEL G, Jérôme B. QFT controller optimization for automatic design [C]// *Proc of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. Sydney, Australia: IEEE Press, 2000: 4735–4740.
- [46] NANDAKUMAR R, HALIKIAS G D, ZOLOTAS A C. An optimization algorithm for designing fixed-structure controllers using the QFT method [C]// *2002 IEEE Int Symposium on Computer Aided Control System Design Proceedings*. Glasgow, Scotland, U K: IEEE Press, 2002: 157–162.
- [47] BRYANT G F, HANLIKIAS G D. Optimal loopshaping for systems with large parameter uncertain via linear programming

- [J]. *Int J Control*, 1995, 62(3): 557–568.
- [48] THOMSON D F, NWOKAH O D I. Analytical loop shaping methods in quantitative feedback theory [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1994, 116(2): 169–177.
- [49] YANIV O, NAGURKA M. Design of PID controllers satisfying gain margin and sensitivity constraints on a set of plants [J]. *Automatica*, 2004, 40(1): 111–116.
- [50] YANIV O, NAGURKA M. Automatic loop shaping of low order QFT controllers [C]// *Proc 2004 23rd IEEE Convention*. Tel-Aviv, Isr: IEEE Press, 2004: 29–32.
- [51] HOUPIS C H, SATING R R, RASMUSSEN S, SHELDON S. Quantitative feedback theory technique and applications [J]. *Int J Control*, 1994, 59(1): 39–70.
- [52] PHILLIPS S N, PACHTER M. A QFT Subsonic envelope flight control system design [C]// *Proc of the IEEE 1995 on National Aerospace and Electronics Conference*. Dayton, OH: IEEE Press, 1995: 537–544.
- [53] KEATING M S, PACHTER M, HOUPIS C H. Fault tolerant flight control system: QFT design [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 551–559.
- [54] PACHTER M, HOUPIS C H, TOROSEN P W. Design of an air-to-air automatic refueling flight control system using quantitative feedback theory [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 561–580.
- [55] PHILLIPS S N, PACHTER M, HOUPIS C H, RASMUSSEN S J. A QFT subsonic envelope flight control system design [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 581–591.
- [56] RASMUSSEN S J, HOUPIS C H. Development, implementation and flight test of a MIMO digital flight control system for an unmanned research vehicle designed using quantitative feedback theory [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 629–642.
- [57] PACHTER M, HOUPIS C H, KANG K. Modeling and control of an electro-hydrostatic actuator [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 591–608.
- [58] KENT G, HANMILTON J, FRANCHEK M A. Robust controller design and experimental verification of I. C. engine speed control [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(6): 609–627.
- [59] HOROWITZ I, ARNOLD P B, HOUPIS C H. Yf16ccv flight control system reconfiguration design using quantitative feedback theory [C]// *Proc of the IEEE on National Aerospace and Electronics Conference*. Dayton, OH: IEEE Press, 1985: 578–585.
- [60] WU S F, GRIMBLE M J, WEI W. QFT-based robust/fault-tolerant flight control design for remote pilotless vehicle [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2000, 8(6): 1010–1016.
- [61] CLOUGH B T, HOROWITZ I, HOUPIS C H. Robust controller design for a short take-off and landing (STOL) aircraft using quantitative feedback theory [C]// *Proc of the IEEE on National Aerospace and Electronics Conference*. Dayton, OH: IEEE Press, 1986: 440–447.
- [62] NAVID N, NARIMAN S. A QFT fault-tolerant control for electrohydraulic positioning systems [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2002, 10(4): 626–632.
- [63] KARPENKO M, NARIMAN S. Fault-tolerant control of a servohydraulic positioning system with crossport leakage [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2005, 13(1): 155–161.
- [64] SUHADA J, MATTHEW A, FRANCHEK. A QFT-type design methodology for a parallel plant structure and its application in idle speed control [J]. *Int J Control*, 1994, 60(5): 653–670.
- [65] YOUNG SOO P M, YOSSIE C, MAARTEN S. Inversion-free design algorithms for multivariable quantitative feedback theory: an application to robust control of a CD-ROM [J]. *Automatica*, 1997, 33(5): 925–920.
- [66] 王进华. 混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 45–53.
(WANG Jinhua. Design of mixed H_2/H_∞ [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 45–53.)
- [67] 冯俊娥, 程兆林. 不确定性奇异时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 158–164.
(FENG June, CHENG Zhaolin. Robust H_∞ control of uncertain singular systems with delay in state [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(2): 158–164.)
- [68] 周涌, 陈庆伟, 胡维礼. 内模控制研究的新发展 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 475–482.
(ZHOU Yong, CHEN Qingwei, HU Weili. New developments of research on internal model control [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 475–482.)
- [69] 宗广灯, 武玉强, 杨洪勇. 一类离散时间切换混杂系统鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 728–732.
(ZONG Guangdeng, WU Yuqiang, YANG Hongyong. Robust control for a class of discrete time switched hybrid systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(5): 728–732.)
- [70] 方存光, 王伟. 自主飞艇俯仰姿态动力学建模及控制 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 231–238.
(FANG Cunguang, WANG Wei. Pitching attitude dynamics modeling and its control of unmanned dirigible airship [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(2): 231–238.)

作者简介:

王增会 (1979—), 男, 博士研究生, 主要研究领域为定量反馈理论、预测控制, E-mail: wangzengh@126.com;

陈增强 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性控制, 预测控制, 智能控制研究, E-mail: chenzq@nankai.edu.cn;

孙青林 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为预测控制、过程控制和频域控制;

袁著社 (1937—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为自适应控制、预测控制和过程控制。