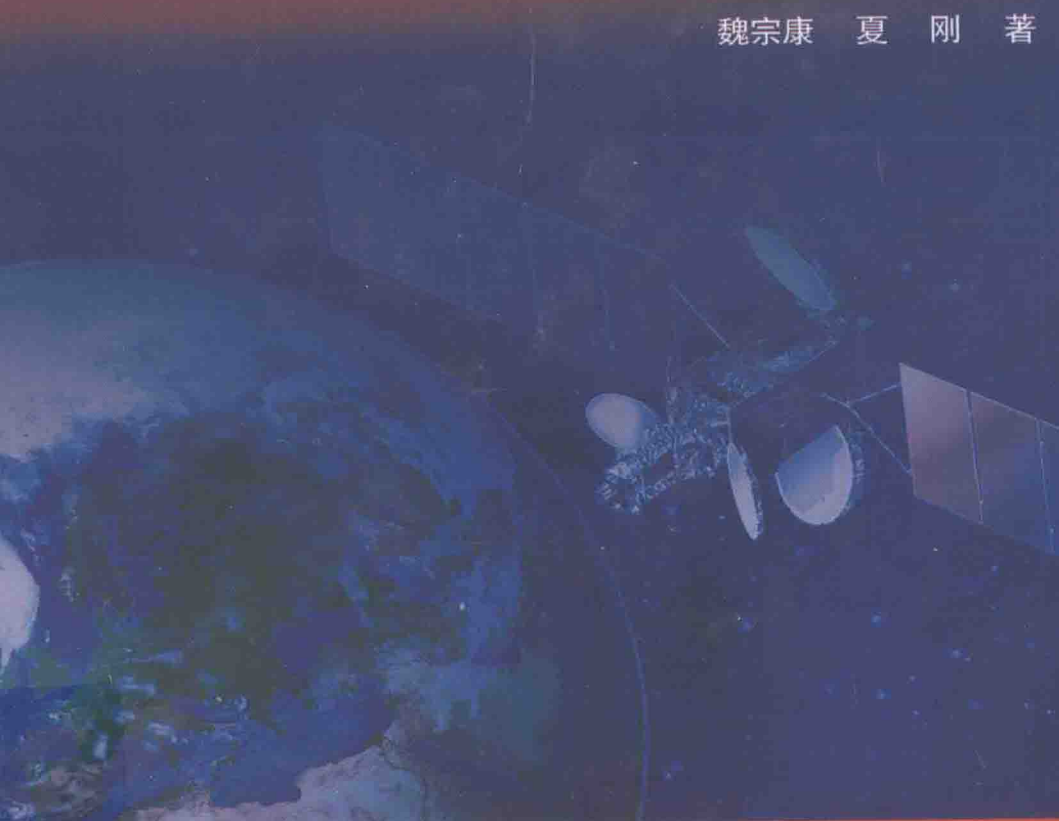




航天科技图书出版基金资助出版

H_{∞} 控制理论在惯性技术 应用中的设计方法

魏宗康 夏 刚 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

H_{∞} 控制理论在惯性技术 应用中的设计方法

魏宗康 夏 刚 著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

H。控制理论在惯性技术应用中的设计方法 / 魏宗康, 夏刚著. — 北京: 中国宇航出版社, 2012. 4

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0182 - 4

I. ①H… II. ①魏… ②夏… III. ①

H。控制 - 应用 - 航天导航: 惯性导航系统 - 设计 IV. ①V249. 32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 050303 号

责任编辑 马 航 封面设计 京鲁图文 责任校对 祝延萍

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900

(010)88530478(传真)

(010)68768541

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部

北京宇航文苑

(010)68371105

(010)62529336

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2012 年 4 月第 1 版

2012 年 4 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 11.625

字 数 320 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0182 - 4

定 价 68.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序

惯性导航是一门综合了机电、光学、数学、力学、控制及计算机等学科的技术，是现代科学技术发展到一定阶段的产物。惯性导航系统具有自主性、隐蔽性和能获取运载体完备运动信息等特点，可在全天候条件下进行连续的定位和定向。这种独特优点是诸如无线电导航、卫星导航和天文导航等其他导航系统无法比拟的。尽管这些导航系统的某些导航性能可能远远优于惯性导航系统，但惯性导航系统仍然是重要飞行器不可缺少的核心导航设备。因而惯性导航系统是现代武器和运载器等飞行器的运动信息观测手段，在现代武器装备及民用领域中具有重要的地位。

惯性导航系统可分为平台式和捷联式两种基本类型。平台式惯性导航系统是用机电控制方法建立起来的物理实体平台，用于模拟导航、制导和控制系统所要求的惯性坐标系。由于有平台伺服回路隔离了飞行器的角运动，则用于导航解算的加速度计误差模型中可不考虑与角运动有关的误差项。因此，平台式惯性导航系统主要用于战略武器和运载火箭控制系统。捷联式惯性导航系统与载体直接固连，通过解算姿态微分方程建立起一个数学的导航坐标系，即导航坐标系以数学平台形式存在。随着高精度、大量程速率陀螺仪技术的发展，动调陀螺捷联系统、激光陀螺捷联系统、光纤陀螺捷联系统、MEMS捷联系统逐渐应用于各种载体中。

在惯性导航系统中，控制技术起着至关重要的作用。平台系统依靠陀螺仪、稳定回路使台体稳定在惯性空间，而捷联系统中惯性仪表采用力反馈回路来实现角速度或加速度等信息的敏感。平台系统的初始对准中，也是通过调平回路和方位对准回路分别实现水平

对准和方位对准。上述过程的实现,都需要设计满足各种性能指标的控制 器。

目前,惯性导航系统中的控制器广泛采用经典频率域控制的设计方法,主要回路控制器采用模拟电路实现。随着控制技术的发展,我们对一些新型的控制理论和方法在惯性导航系统中的应用进行了探索,目的是提高惯性导航系统的精度、鲁棒性、可靠性、环境适应性以及满足小型化等需求。

鲁棒控制理论是对线性系统理论深层次的发展,是控制科学与工程学科以及其他相关学科的科技工作者所需要的重要基础知识。鲁棒控制研究的主要内容是系统存在参数不确定性和结构摄动时如何设计控制器,使得相应的闭环系统具有期望的性能。鲁棒控制问题吸引了国内外众多学者参与研究,发展了各具特色的研究方法,诸如参数空间法、多项式方法、H_∞方法、QFT方法等。其中,从理论的系统完整性以及工程应用的成功事例来看,H_∞方法一直在鲁棒控制中占有重要地位。

作者在总结惯性导航技术研究及工程实践的基础上编写了《H_∞控制理论在惯性技术应用中的设计方法》一书,全书系统地论述了 H_∞控制理论在工程应用时的设计方法和技巧,以惯性导航系统为应用背景,重点介绍了平台系统稳定回路 H_∞控制设计方法、捷联系统伺服回路 H_∞控制设计方法、惯性导航系统初始对准 H_∞控制设计方法以及组合导航系统 H_∞控制设计方法等相关内容。

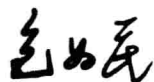
本书内容较为全面,涵盖了惯性导航系统的两种基本类型,并分别对四轴平台伺服系统的建模及其解耦、动调陀螺捷联系统的建模及其解耦、捷联系统全方位初始对准技术、长航时组合导航航向保持技术等进行了较为深入的探讨和论述,各章节的技术内容与实际应用紧密结合,全书具有较强的理论与应用相结合的特色,对从事惯性导航系统技术研究和产品设计的人员,以及相关高等院校师生等都具有参考价值。

希望本书的出版，对我国惯性导航系统的控制技术的发展和，对相关领域技术人才的培养都能起到促进作用。

中国航天科技集团公司

科学技术委员会 主任

中国科学院 院士



2012 年 3 月 16 日

前 言

惯性导航技术是一门综合了机电、光学、数学、力学、控制及计算机等学科的尖端技术,是现代科学技术发展到一定阶段的产物。由于惯性是所有质量体的基本属性,所以建立在惯性原理基础上的导航系统不需要任何外来信息,也不会向外辐射任何信息。仅靠惯性导航系统本身就能在全天候条件下,在全球范围内和任何介质环境里自主隐蔽地进行连续的三维定位和三维定向,因此是重要运载体不可缺少的核心导航设备。

控制技术贯穿于惯性导航系统中,目前控制方法基本采用经典频率域控制的设计方法,控制器的结构和参数的选择完全依赖于个人的经验。随着控制技术的发展和出现了一些新型的控制理论和方法,本书是在紧密跟踪国际研究前沿和取得自主创新研究成果的基础上撰写而成的,根据作者的工作经验介绍了 H_{∞} 控制理论在惯性导航系统应用中的设计方法。本书第 1 章概要介绍了 H_{∞} 控制理论及本书的主要内容,第 2 章介绍了模型匹配问题的相关理论,第 3 章给出了四轴平台的稳定回路模型以及捷联系统陀螺仪伺服回路和加速度计伺服回路的模型,第 4 章给出了平台稳定回路不同指标条件下的 H_{∞} 控制设计方法,第 5 章介绍了捷联系统伺服回路 H_{∞} 控制设计及其解耦技术,第 6 章介绍了捷联系统和平台系统的初始对准方法,第 7 章给出了捷联系统和平台系统基于地理坐标系的导航误差修正方法。

由于国内有关 H_{∞} 控制理论的书籍以理论推导为主,侧重于公式和定理的证明。而有关惯性技术的书籍没有与 H_{∞} 控制理论相结合的内容。因此,本书是国内第一部以 H_{∞} 控制理论为主线介绍惯性导航系统的图书。

本书在编写过程中,北京理工大学伍清河教授、航天科工集团三院 33 所胡平华研究员、航天科技集团 13 所杨立溪研究员、胡宝

余研究员等提出了宝贵意见；此外，本书还得到了航天 13 所吴涛高工、张猛主任以及宇航出版社的张铁钧副社长、马航编辑的支持；中国航天科技集团公司科技委主任包为民院士审阅了全书并为本书作序，作者谨向以上各位专家及同事深表感谢。

由于作者水平有限，加上编写时间十分仓促，书中缺点、错误在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2012 年 4 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
第 2 章 H_∞ 鲁棒控制设计方法	9
2.1 控制系统设计准则	9
2.1.1 设计中的矛盾因素与限制条件	9
2.1.2 对象的不确定性	11
2.1.3 设计准则	13
2.2 基于状态空间理论的 H_∞ 控制设计方法	15
2.2.1 增广对象	15
2.2.2 Youla 参数化	16
2.2.3 模型匹配问题	17
2.2.4 广义距离问题	20
2.2.5 传递函数矩阵的谱分解	25
2.2.6 矩阵 $G(s)$ 的 Hankel 范数	26
2.2.7 最优 Hankel 范数逼近问题的一类解	29
2.2.8 模型匹配问题的一种解法	32
2.3 H_∞ 控制设计流程示例	33
2.3.1 平台稳定回路 H_∞ 性能指标	34
2.3.2 Youla 参数化	37
2.3.3 模型匹配	38
2.3.4 广义距离问题	38
2.3.5 传递函数矩阵的内外分解	39
2.3.6 传递函数矩阵的谱分解	41

2.3.7 最优逼近	45
2.3.8 回代求解	47
第3章 惯性测量装置伺服系统模型	54
3.1 动调陀螺仪动力学方程	54
3.1.1 动调陀螺仪运动方程及传递函数	54
3.1.2 动调陀螺仪特征多项式分析	57
3.1.3 输入角(或角速度)作用时传递函数分析	58
3.1.4 外力矩作用时传递函数分析	59
3.1.5 转子初始偏角作用时传递函数分析	61
3.2 四轴平台稳定回路模型	62
3.2.1 四轴平台运动学模型	62
3.2.2 四轴平台动力学模型	71
3.2.3 四轴平台力矩交链的解耦	78
3.2.4 用动调陀螺仪构成的四轴平台稳定回路方块图	85
3.2.5 平台稳定回路简化模型	88
3.3 动调陀螺捷联系统伺服回路模型	91
3.3.1 动调陀螺捷联系统的组成及功能	91
3.3.2 动调陀螺仪伺服回路模型	92
3.3.3 动调陀螺仪组合的输出	95
3.3.4 石英加速度计伺服回路	97
3.3.5 加速度计组合的输出	99
第4章 平台系统稳定回路 H_∞ 控制设计	102
4.1 平台稳定回路高增益控制器的设计	102
4.2 稳定裕度宽范围控制器的设计	107
4.3 三轴平台稳定回路 MIMO 控制器设计	110
4.3.1 平台稳定回路 H_∞ 性能指标	112
4.3.2 增广对象	117
4.3.3 零状态控制器设计	123

4.3.4 平台稳定回路 MIMO 控制器设计	128
4.4 平台稳定回路有饱和特性时的 H _∞ 控制设计	133
4.5 平台稳定回路非线性分析及控制思路	136
4.5.1 无条件稳定系统非线性分析	137
4.5.2 条件稳定系统非线性分析及电路切换方法	137
4.6 平台稳定回路数字控制设计	147
4.6.1 采样频率选择及设计方法概述	147
4.6.2 平台稳定回路模拟——离散设计	148
4.6.3 平台稳定回路基于 ω 平面的数字控制器设计	150
4.6.4 平台稳定回路试验结果	157
4.7 平台稳定回路智能复合控制设计	163
4.7.1 平台稳定回路快速最优 (Bang-Bang) 控制设计	163
4.7.2 平台稳定回路模糊控制设计	170
4.7.3 平台稳定回路智能复合控制设计	178
4.7.4 平台稳定回路智能复合控制试验结果	182
第5章 捷联系统伺服回路 H_∞控制设计	188
5.1 动调陀螺仪伺服系统单回路 H _∞ 控制设计	188
5.1.1 不考虑章动环节时的控制器设计	188
5.1.2 考虑章动环节时的控制器设计	195
5.1.3 提高系统带宽的制约环节	200
5.2 动调陀螺仪伺服回路 MIMO 控制器设计	202
5.2.1 多变量控制系统的解耦技术	202
5.2.2 多变量系统的 H _∞ 设计	203
5.2.3 动调陀螺仪输出系统解耦设计	210
5.3 石英加速度计伺服回路 H _∞ 控制设计	212
5.3.1 石英加速度计伺服原理	212
5.3.2 伺服系统性能指标分析	214

5.3.3 包含一阶积分环节的 H_{∞} 控制设计	216
5.3.4 包含二阶积分环节的 H_{∞} 控制设计	218
第 6 章 惯性导航系统初始对准 H_{∞} 控制设计	220
6.1 捷联系统初始对准运动学方程及流程图	220
6.1.1 捷联系统静基座对准	220
6.1.2 捷联系统晃动基座对准	225
6.2 捷联系统晃动条件初始对准 H_{∞} 控制设计	232
6.2.1 捷联系统晃动基座水平对准性能分析	233
6.2.2 捷联系统晃动基座水平对准回路 H_{∞} 控制设计	236
6.2.3 捷联系统晃动基座方位对准 H_{∞} 控制设计	239
6.3 捷联系统晃动基座四象限对准方法	244
6.3.1 捷联系统晃动基座方位粗对准方法	244
6.3.2 捷联系统晃动基座方位精对准方法	245
6.3.3 捷联系统晃动基座四象限方位对准稳定性分析	248
6.3.4 捷联系统晃动基座四象限方位对准流程	254
6.4 捷联系统晃动基座全方位对准	254
6.4.1 捷联系统晃动基座全方位对准方法	254
6.4.2 捷联系统晃动基座全方位对准稳定性分析	255
6.5 基于状态观测器的初始对准方法	257
6.5.1 以角度作为输出量的状态观测器	258
6.5.2 广义卡尔曼滤波估计	263
6.5.3 H_{∞} 滤波估计	267
6.6 平台系统初始对准	270
6.6.1 平台系统静基座对准运动学方程	270
6.6.2 平台系统静基座多位置对准方程	276
6.6.3 平台系统晃动基座对准方法	280
6.7 平台系统水平对准 H_{∞} 控制设计	283
6.7.1 平台系统静基座水平对准性能分析	283

6.7.2	平台系统静基座水平对准 H ∞ 控制设计	285
6.7.3	平台系统晃动条件下调平回路性能分析	288
6.7.4	平台系统调平回路 H ∞ 控制设计	290
第7章	组合导航系统 H∞控制设计	294
7.1	捷联系统导航方程及误差方程	294
7.1.1	捷联系统在地理坐标系里表示的导航方程	294
7.1.2	捷联系统在地理坐标系里的导航误差方程	296
7.2	平台系统导航方程及误差方程	299
7.2.1	平台系统在地理坐标系里表示的导航方程	299
7.2.2	平台系统在地理坐标系中的导航误差方程	300
7.3	惯性导航误差修正原理	302
7.3.1	位置修正方法	302
7.3.2	速度修正方法	305
7.3.3	捷联系统水平姿态修正方法	307
7.3.4	平台系统水平姿态修正方法	318
7.3.5	方位修正方法	321
7.3.6	仪表误差修正	324
7.3.7	捷联系统姿态修正实现方法	331
7.3.8	组合导航修正方法	331
7.4	惯性导航高度通道误差阻尼 H ∞ 控制设计	336
7.4.1	高度通道误差发散原理	336
7.4.2	高度通道 PID 阻尼方案	337
7.4.3	高度通道阻尼 H ∞ 控制设计	339
7.5	惯性导航水平通道误差阻尼 H ∞ 控制设计	343
7.5.1	水平通道速度阻尼环节	344
7.5.2	水平通道参数鲁棒稳定性分析	345
参考文献		349

第1章 绪 论

惯性导航是一门综合了机电、光学、数学、力学、控制及计算机等学科的尖端技术，是现代科学技术发展到一定阶段的产物。由于惯性是所有质量体的基本属性，所以建立在惯性原理基础上的导航系统不需要任何外来信息，也不会向外辐射任何信息。仅靠惯性导航系统本身就能在全天候条件下，在全球范围内和任何介质环境里自主隐蔽地进行连续的三维定位和三维定向。这种同时具备自主性、隐蔽性和能获取运载体完备运动信息的独特优点是诸如无线电导航、卫星导航和天文导航等其他导航系统无法比拟的，尽管这些导航系统的某些导航性能可能远远优于惯性导航系统，但惯性导航仍然是重要运载体不可缺少的核心导航设备。

惯性导航系统分为平台式和捷联式两种基本类型。平台式惯性导航系统是用机电控制方法建立起物理实体平台，用于模拟所要求的导航坐标系。由于有惯性平台隔离了运载体的角运动，导航坐标系的旋转又十分缓慢，所以平台式惯性导航系统中陀螺的动态范围可以很小，导航计算机的解算负担也比较轻。捷联式惯性导航系统的最大特点是依靠算法建立起导航坐标系，即导航坐标系以数学平台形式存在，这样省略了复杂的物理实体平台，结构简单、体积小、质量小、成本低，还可通过余度技术提高系统的容错能力。

控制技术贯穿于惯性导航系统中。比如，在捷联系统中的仪表伺服系统可把运载体的角速度、加速度转换成测量所需要的电压或电流信号，而平台系统中的稳定回路可隔离运载体的角运动。对于有温控的惯性导航系统，通过温控回路实现系统内部的恒温环境。在平台系统的初始对准中，通过调平回路和方位对准回路分别实现水平对准和方位对准。在组合惯性导航系统中，利用外部信息通过

高度阻尼回路、水平修正回路等阻尼惯性导航的误差。

对于惯性导航系统中的控制方法目前基本采用经典频率域控制的设计方法，控制器的结构和参数的选择完全依赖于个人的经验。随着控制技术的发展，出现了一些新型的控制理论和方法，本书根据作者的工作经验介绍了 H_∞控制理论在惯性导航系统应用中的设计方法。

H_∞控制理论作为鲁棒控制的一个分支，是利用现代时域控制理论来实现经典频率域控制的方法。其优点是可将个人经验通过计算机编程实现，简化了设计，同时可实现多输入多输出系统（MIMO）的控制器设计。其难点是需要较深的控制理论基础，本书写作意图就是通过对理论的介绍，结合惯性技术给出不同使用条件下的设计实例。

控制系统的设计是采用某一种方法使一个控制器满足不同的性能指标。归纳起来，系统的性能指标包括：

- 1) 闭环系统的鲁棒稳定性；
- 2) 系统对外干扰的灵敏性；
- 3) 闭环系统的动态性能；
- 4) 闭环系统的交链作用；
- 5) 稳态响应及误差；
- 6) 对参数变化的鲁棒性；
- 7) 闭环系统的整体性。

给定对象以后，要设计一个满意的反馈系统，就是要确定一个正则的（分母的阶次不小于分子的阶次）校正环节，使闭环系统满足设计性能要求。要设计一个同时满足上述各项性能指标的控制器实属困难，因此，在设计控制系统的校正环节时，必须分清性能指标要求的主次，在满足主性能指标的前提下，尽可能照顾其他性能指标的要求。然而，在上述诸项指标中，闭环系统的鲁棒稳定性和对外干扰灵敏性显得极为重要，它们是闭环控制系统能够工作的必要条件。

对于单输入单输出系统（SISO），系统带宽体现了闭环系统的鲁

棒稳定性, 相位余度和幅值余度体现了参数变化的鲁棒稳定性, 而精度指标体现了系统的稳态误差和动态性能。因此, 在 H_∞ 控制理论中, 通过性能界函数体现精度指标, 以及对象不确定性界函数体现鲁棒稳定性, 在上述两个界函数的限制下设计的控制器可实现在不同性能指标之间的折衷。

H_∞ 控制理论的设计首先是通过特定的结构形式 (如图 1-1 所示) 把界函数考虑到控制系统中, 构成一个新的增广对象模型及其闭环传递函数。设计的目的是要求解控制器 $C(s)$, 使这个闭环传递函数 M 的 H_∞ 范数最小。

在 H_∞ 理论中, 这个 M 对应于图 1-1 所示的闭环传递函数。

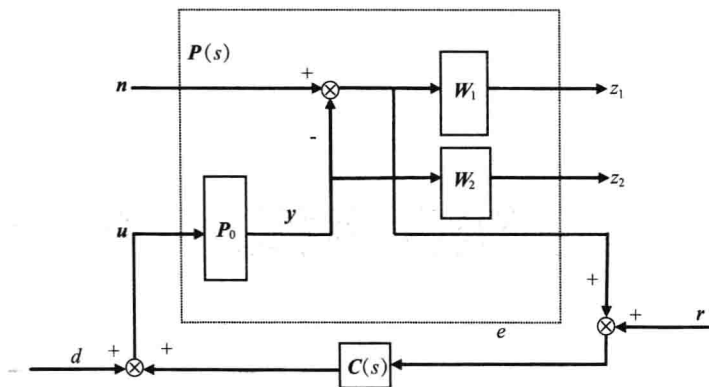


图 1-1 增广对象

由于满足上述条件的控制器有无穷多个, 可通过对控制器 $C(s)$ 进行 Youla 参数化来表示成 $Q(s)$ 的函数。因此, 可将 H_∞ 一般框架表示为图 1-2 所示的形式。

消去中间变量, 可转化为模型匹配问题, 如图 1-3 所示。

因此, 控制系统的设计就转化为模型匹配问题。即

$$\min_{Q \in RH_\infty} \|T_1(s) - T_2(s)Q(s)T_3(s)\|_\infty \quad (1-1)$$

式中 $T_1 \in RH_\infty^{m \times r}$, $T_2 \in RH_\infty^{m \times p}$, $T_3 \in RH_\infty^{q \times r}$, $Q \in RH_\infty^{p \times q}$ 。