

基于鲁棒稳定的闭环激磁电源幅值回路设计¹

曾 鸣 张东纯 苏宝库 沈 毅

(哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001)

摘 要 保证系统鲁棒稳定,同时满足系统性能指标要求始终是控制设计的目标。该文根据转台测角系统对激磁电源稳定性和性能指标的要求,提出了采用 H_∞ 优化控制理论,以鲁棒稳定为基础的闭环激磁电源幅值回路设计的方法,讨论了 H_∞ 控制器的求解过程。经四个转台长期使用验证该设计方法的有效性和合理性,完全满足了高精度转台的需要。

关键词 鲁棒稳定,性能,闭环控制,激磁电源

中图分类号 TN86

1 概 述

激磁电源为转台测角系统角度传感器-感应同步器提供正弦、余弦激磁信号,由于测角系统要求的精度很高,对激磁电源正弦、余弦两相幅差、相差和输出信号的失真度指标都提出了很高的要求,理论上要保证测角系统精度为 $1''$,则要求激磁电源的正弦、余弦两相幅差为 0.01% ,相差 0.010° ,失真度 0.01% ^[1]。而以往闭环激磁电源的设计采用经典控制理论^[2,3],无法将系统不确定性纳入设计之中,不能直接对系统设计提出鲁棒稳定性要求,难于保证指标的长期稳定性,属于一种分析方法。由于实际闭环系统的真实模型与控制模型之间存在着差异称为系统不确定性,正是由于系统不确定性的存在影响着闭环控制系统的性能和稳定性^[4]。为了保证激磁电源运行指标的长期稳定性、可靠性,满足转台测角系统精度要求,该激磁电源设计要解决的主要问题是保证系统鲁棒稳定性的前提下尽可能的提高系统的性能,这就提出了基于鲁棒稳定条件下的激磁电源的闭环设计问题。 H_∞ 优化控制理论^[5]将系统鲁棒稳定性约束和系统性能要求统一在 H_∞ 范数之下,通过优化设计可获得保证系统鲁棒稳定的同时,最大限度地提高系统性能的优点^[5-7],为闭环激磁电源设计提供了先进的优化工具,是一种真正意义上的综合设计方法。为此本文在实际三轴精密测试转台设计中提出采用 H_∞ 优化控制理论对闭环激磁电源幅值回路进行优化设计的方案。

2 优化控制的混合灵敏度问题

混合灵敏度问题在复数域 s 平面上将模型不确定性影响表示为

$$\tilde{P}(s) = [I + \Delta P(s)]P(s) \quad (1)$$

这里 I 表示单位矩阵, P 表示名义对象, ΔP 为输出乘型摄动, \tilde{P} 为实际对象,设摄动 $\Delta P(j\omega)$ 的最大奇异值满足

$$\bar{\sigma}[\Delta P(j\omega)] < |W_2(j\omega)| \quad (2)$$

系统设计控制器 K 最重要的要求是保证系统鲁棒稳定性,反馈系统在满足 (2) 式的条件下仍保持稳定的充分条件是

$$\bar{\sigma}[PK(I + PK)^{-1}] < |W_2^{-1}| \quad (3)$$

¹ 2000-09-01 收到, 2001-05-09 定稿
国家自然科学基金资助课题 (编号: 69904004)

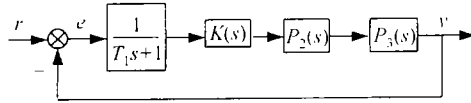


图 1 幅值回路原理框图

可表示为 H_∞ 范数的形式:

$$\|W_2PK(I + PK)^{-1}\|_\infty < 1 \quad (4)$$

除了鲁棒稳定性要求外, 设计中还要求系统满足一定的性能指标, 通常要求在外干扰作用下, 对输出 y 的影响尽量的小, 即

$$\bar{\sigma}[(I + PK)^{-1}] < \|W_1^{-1}\| \quad (5)$$

表示为 H_∞ 范数的形式为

$$\|W_1(I + PK)^{-1}\|_\infty < 1 \quad (6)$$

这就是典型的鲁棒镇定和最优灵敏度问题。为了使 (4) 和 (6) 式同时获得满足, 在控制中, 对系统的性能和鲁棒稳定性的要求可用一个统一的形式来描述, 即

$$C = \left\| \begin{array}{c} W_1 S \\ W_2 T \end{array} \right\|_\infty \quad (7)$$

式中 C 称为代价函数

设计要求为求取镇定的控制器 K , 使

$$\min_{K_{\text{stabilizing}}} \left\| \begin{array}{c} W_1 S \\ W_2 T \end{array} \right\|_\infty \leq 1 \quad (8)$$

式中 $S = (I + PK)^{-1}$ 为灵敏度函数, $T = I - S = PK(I + PK)^{-1}$ 为补灵敏度函数。

(8) 式所表示的优化问题就是混合灵敏度问题, 它将系统鲁棒稳定性约束和性能要求, 转化为在 H_∞ 范数意义下的最优问题。优化设计得全通特性^[4], 即

$$|W_1(j\omega)S(j\omega)|^2 + |W_2(j\omega)T(j\omega)|^2 = 1 \quad (9)$$

权函数 W_1 和 W_2 分别反映了系统在干扰作用下的性能要求和模型不确定下的鲁棒稳定性要求。

3 闭环幅值回路控制器设计

根据幅值回路实际特性测试结果, 在其工作点附近幅值回路可以简化成如图 1 的低频模型形式。图 1 中 $1/(T_1s + 1) = 1/(0.0042s + 1) = P_1(s)$ 为幅值回路精密整流部分的等效环节, $P_2(s) = 2.6/(0.002s + 1)$ 为调幅环节的实测模型, 在其工作点附近可以简化为 $P_2(s) = 2.6$, 其中的惯性环节部分作为系统的不确定性来处理; $P_3(s) = 2.5$ 是闭环激磁电源功放环节在工作点附近的简化模型, 可见未校正的幅值回路系统是一个有差系统。因此必须通过控制器 $K(s)$ 的设计来满足幅值回路的稳定性和性能指标要求。其中系统名义对象为 $P(s) = P_1(s) \cdot P_2(s) \cdot P_3(s) = 6.5/(0.0042s + 1)$ 。

3.1 幅值回路的性能要求和不确定性的考虑

幅值回路设计保证幅差精度的考虑, 是以幅值回路正弦、余弦各自幅值的稳定为基础, 即正弦幅值稳定在精密基准上, 余弦幅值跟随正弦幅值。因此余弦幅值回路设计的特殊性在于要保证跟随正弦幅值信号的变化来稳定两相幅值偏差信号不变。由于正弦、余弦幅值回路的设计基本相同, 本文以余弦幅值回路设计为例来说明采用 H_∞ 优化控制理论对闭环激磁电源幅值回路进行优化设计的过程。那么在什么情况下可以保证两相幅值偏差精度满足要求的精度呢? 从跟踪误差上考虑, 设余弦的给定信号最大波动为 50mV 则由 I 型系统的动态误差知: $e(t) = C_1 \dot{r}(t) = \dot{r}(t)/K$ 为满足规定精度要求, I 型系统的增益 K 必须满足: $K \geq \dot{r}(t)/e(t)$, 对于输出有效值为 6V 的余弦信号, 当要求精度为 0.01% 时, 则由上述分析求得满足要求的 K 为

$$K \geq 50/(6 \times 10^3 \times 0.01\%) \approx 83.3 \text{rad/s} \quad (10)$$

幅值回路内的干扰主要来源于温度的变化, 这种阶跃波动干扰是很缓慢的可用稳态误差来近似考虑其影响。若幅值回路设计成为 I 型系统, 则这种波动所造成的误差为零。

如果考虑到输出端产生的干扰(如负载波动等因素), 作为对系统设计提出的要求, 为了抑制这种干扰使输出幅度达到要求的精度。当假设干扰的最大波动幅度为 600mV, 则由干扰造成的误差公式可以求得此时满足精度所要求的最小增益为

$$K \geq 153.8 \text{rad/s} \quad (11)$$

综上所述, 为了减少跟踪误差提高抗干扰抑制能力, 希望系统增益尽可能的大。此外为能有效地抑制激磁电源输出信号的 2kHz 波形对控制回路的噪声干扰, 幅值回路的带宽应满足: $\omega_c \ll 2\pi \cdot 2000 \text{rad/s}$ 的原则要求。

幅值回路的不确定性主要是由于忽略了小时间常数环节的动态特性所引起, 如忽略掉的调幅环节和功放环节、带通滤波器的小时间常数等。考虑到不确定性仍存在着一些未知因素, 为保证幅值闭环回路工作的长期稳定性, 出于保守起见, 应在建立鲁棒稳定性界函数时给予充分的考虑。考虑到将调幅环节的 $1/(0.002s + 1)$ 看作为系统的不确定性, 并用 $e^{-\tau s}$ 来近似, 在适当放大的基础上, 取 $\tau = 0.002s$, 并用 3τ 即 $e^{-3\tau s}$ 来归纳幅值回路总的不确定性, 以此考虑幅值回路鲁棒稳定性权函数 $W_2(s)$ 的选择。

3.2 控制器 $K(s)$ 的 H_∞ 优化设计

幅值闭环回路追求的目标是最大限度地保证稳定的同时提高系统的性能, 即允许系统摄动——要求系统具有鲁棒稳定性, 在此前提下保证系统性能。满足性能要求就是最大限度地降低对干扰的灵敏性。 H_∞ 优化设计能够在其寻优目标函数中对鲁棒稳定性约束和性能要求进行统一考虑, 这就为闭环激磁电源的设计提供了一种新的优化设计方法。由 H_∞ 控制理论可知幅值回路闭环控制的设计问题可以表示成 H_∞ 混合灵敏度问题, 将幅值回路的性能指标要求表示成对性能权函数的要求, 而将稳定性要求表示成鲁棒稳定性约束, 即

$$|S(j\omega)| \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad (12)$$

$$|T(j\omega)| \leq |W_2^{-1}(j\omega)| \quad (13)$$

将幅值回路的闭环设计问题转换成标准的混合灵敏度问题, 从而通过优化设计由 H_∞ 控制理论的混合灵敏度问题的方法来求解相应的控制器。

3.2.1 性能权函数 $W_1(s)$ 的确定 权函数 $W_1(s)$ 的选择体现的是闭环系统要求的性能^[8], 由上述分析知, 为能有效地保证性能指标的实现, 幅值回路系统应设计成为 I 型系统, 并且要保证足够高的增益和适当的带宽。因此 W_1 应按如下形式:

$$W_1(s) = \rho/s \quad (14)$$

选取, 其中 ρ 是满足性能指标要求的优化参数, 此外为避免广义对象出现虚轴上的极点而引起计算问题^[6], 最后取 $W_1(s)$ 为

$$W_1(s) = \rho / (s + 0.001) \quad (15)$$

3.2.2 鲁棒稳定权函数 $W_2(s)$ 的选择 选择 $W_2(s)$ 应满足最大鲁棒稳定性要求和求解控制器优化算法的可实现性。由上面分析知,幅值回路存在着 $e^{-3\tau s}$ 不确定性的模型摄动,这样的摄动下要求幅值回路系统鲁棒稳定, $W_2(s)$ 就是容许这种摄动的约束条件。为了能有效表征不确定性随频率提高而增强的特点,使系统满足鲁棒稳定条件(13)式,将 $W_2(s)$ 选择为单调递增函数,由(1),(2)式故可取 $W_2(s) = 0.006s$ 。为保证算法的可实现性,要求 $1/W_2$ 的阶次不应低于名义对象 P 的阶次,同时为避免虚轴上的零点^[6]。最终将 $W_2(s)$ 选择为如下形式:

$$W_2(s) = 0.006s + 0.00001 \quad (16)$$

3.2.3 求解控制器 $K(s)$ 由 $P(s)$, $W_1(s)$, $W_2(s)$ 求得广义对象 $G(s)$ ^[6],然后利用 Matlab 中的 hinfopt 和 hinf 函数求取代价函数在满足(8)式和(9)式条件下的镇定控制器,最后得到 $\rho = 166$ 时的 H_∞ 优化控制器的状态空间表达式为

$$\begin{aligned} A_{cp} &= \begin{bmatrix} -0.94694 & -85.817 \\ -458.58 & -41603 \end{bmatrix}, & B_{cp} &= \begin{bmatrix} -39.036 \\ 218.59 \end{bmatrix} \\ C_{cp} &= [-0.42258 \quad 20.339], & D_{cp} &= 0 \end{aligned}$$

包括对象、控制器的极点、零和幅值回路的总增益分别为 $P_1 = -238.10$, $P_2 = -0.001$, $P_3 = -41604$, $Z_1 = -238.10$, $K=6906300$ 。所以实际最优控制器的传递函数为

$$K(s) = 1062507.7(s + 238.1) / [s(s + 41604)] \quad (17)$$

可见优化控制为满足设计要求在其最优控制器的传递函数中形成了一个与对象极点相同的零点。考虑到极点 P_3 所形成的惯性环节时间常数很小,可将其略去得到降阶控制器

$$K(s) = 25.5(s + 238.1) / s \quad (18)$$

3.2.4 结果分析 幅值回路由 H_∞ 控制器所形成的开环频率特性如图 2,其剪切频率 $\omega_c=166$ rad/s,相位裕度 $P_m = 89.8^\circ$,满足系统要求的带宽指标。代价函数在 $\rho = 166$ 时的最大奇异值曲线如图 3。由图可知满足“全通”特性的要求。图 4 是灵敏度函数和权函数 $1/W_1(s)$ 的最大奇异值曲线,由图可以看出在低频段灵敏度函数和权函数 $1/W_1(s)$ 两者互为倒数满足(12)式的条件,图 5 是补灵敏度函数和权函数 $1/W_2(s)$ 的最大奇异值曲线,可见满足(13)式的条件。图 6 是闭环幅值回路系统单位阶跃响应特性曲线,图 7 是闭环幅值回路系统当对象发生了 $1/(0.002s + 1)^3$ 摄动后的单位阶跃响应特性曲线,其中曲线 1 对应的是经典控制理论得到的校正控制器所形成的响应特性曲线,曲线 2 对应的是 H_∞ 控制器所形成的响应特性曲线。比较可得由 H_∞ 控制器所形成的闭环幅值回路系统具有良好的鲁棒稳定性和性能。 H_∞ 控制器降阶后(用(18)式)系统单位阶跃响应特性曲线与图 6 的曲线 2 相同,可见降阶处理对系统没有多大的影响,说明这种处理是合理的。从设计结果得到的控制器形式看与经典频域法得到的控制器形式一样,可用一般的结构形式实现。幅值回路 H_∞ 优化设计的实践说明 H_∞ 优化理论的混合灵敏度方法具有系统严密性,整个设计过程在系统要求的权函数约束下,经 H_∞ 范数寻优求得满足系统要求的 H_∞ 最优控制器。

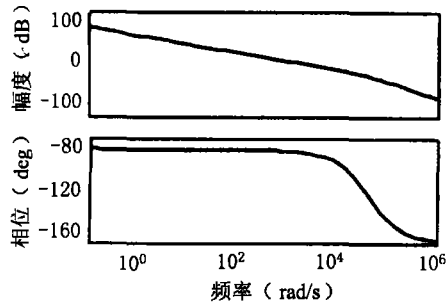


图 2 系统开环频率特性

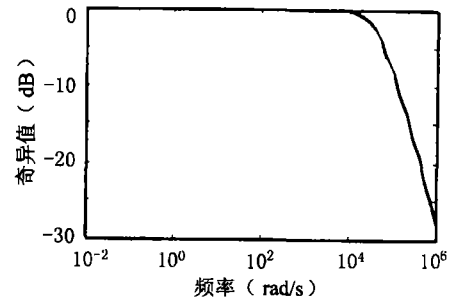


图 3 代价函数

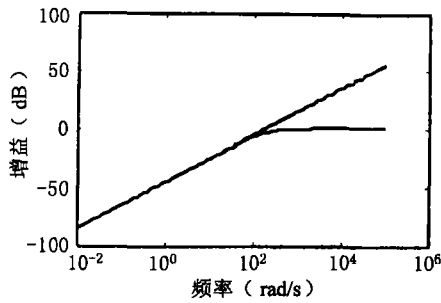
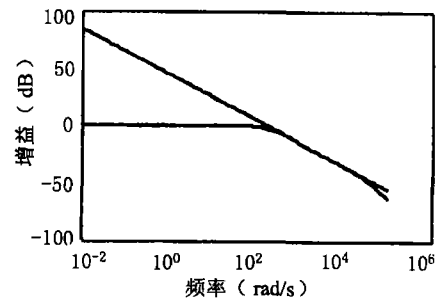
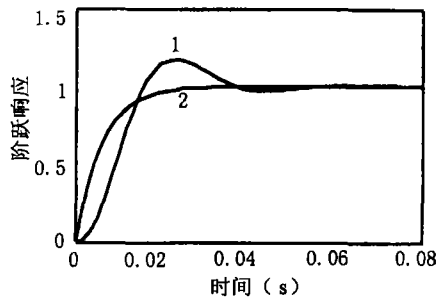
图 4 灵敏度函数和 $1/W_1$ 图 5 补灵敏度函数和 $1/W_2$ 

图 6 系统单位阶跃响应

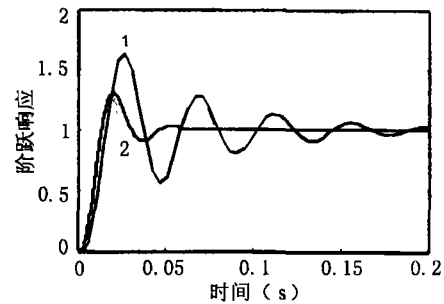


图 7 振荡系统单位阶跃响应

这种方法简化了经典法在设计中需要反复分析来回试凑的过程, 是一种真正意义上的综合方法。当名义系统简化为最简单的一阶形式时, 混合灵敏度方法得到的最优控制器容易在工程实际中实现。实际使用证明: 上述方法求得的控制器满足了幅值回路指标要求, 系统运行稳定可靠。

上述闭环幅值回路设计是以余弦幅值回路为例展开的讨论, 实际中双相激磁电源的正弦、余弦两相幅值回路的闭环设计基本相同, 只不过是正弦幅值锁定在精密电压基准上, 而余弦幅值跟随正弦幅值变化, 从而使闭环激磁电源的输出两相幅值信号之间的幅值偏差保持在要求的精度上。最后经过实际闭环幅值系统电路的时域特性测试与设计仿真结果相一致。这种设计是以鲁棒稳定为基础来保证闭环激磁电源对幅值回路系统稳定性的要求, 在此基础上满足系统的性能指标。长期使用的测试结果显示: 正、余弦两相幅值偏差小于 0.01%。完全满足精密测试转台的实际需要。

4 结 论

本文利用 H_∞ 优化控制理论对某三轴精密测试转台激磁电源系统幅值回路进行了优化设计, 求得了便于工程实现的 H_∞ 控制器, 并在四个转台系统的实际运行中收到了很好的效果。这种基于鲁棒稳定条件下的激磁电源幅值回路的设计方法具有保证系统鲁棒稳定性同时, 最大限度地提高系统性能的优点, 对一般控制系统设计有着普遍的指导意义。该闭环激磁电源由于采用了先进的设计方法使得系统幅值、相位、失真度指标均获得了很高的精度, 满足了高精密度测试转台的特殊需要, 也可用于高精密度仪器仪表的专用电源, 有着良好的推广意义。

参 考 文 献

- [1] 陆永平, 感应同步器及其系统, 北京, 国防工业出版社, 1986, 34-189.
- [2] 马智周, 王作光, 董力松, 模块化精密角度测量系统静态和动态精度的分析, 航空精密制造技术, 1991, (5), 28-31.
- [3] 陈平, 罗晶, 王毅, 王广雄, 苏宝库, 反馈控制感应同步器及相激磁电源研究, 中国惯性技术学报, 1997, 5(1), 53-56.
- [4] J. C. Doyle, G. Stein, Multivariable feedback design concepts for a classical/modern synthesis, IEEE Trans. on Automatic Control, 1981, 26(1), 4-16.
- [5] B. A. Francis, G. Zames, On H_∞ -optimal sensitivity theory for SISO feedback system, IEEE Trans. on Automatic Control, 1984, 29(1), 9-16.
- [6] J. C. Doyle, K. Glover, P. Khargonekar, B. A. Francis, State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems. IEEE Trans, on Automatic Control, 1989, 34(8), 831-847.
- [7] H. Kwakernaak, Robust control and H_∞ -optimization-tutorial paper, Automatica, 1993, 29(2), 255-273.
- [8] L. Petter, S. Sigurd, W. Zi-Q, Performance weight selection for H_∞ and μ -control methods. Trans. of Inst. of Measurement and Control 1991, 13(5), 241-252 .
- [9] 曾鸣, 精密伺服转台的几个设计问题研究, [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 1999, 54-92.

THE DESIGN FOR MAGNITUDE LOOP OF
THE EXCITATION POWER SUPPLY WITH
CLOSED-LOOP CONTROL BASED ON ROBUST STABILITY

Zeng Ming Zhang Dongchun Su Baoku Shen Yi

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Haerbin 150001, China)

Abstract It is always the goal of the control systems design that ensuring the system robust stability and satisfying the requirements of the system performance specifications at the same time. In this paper, based on the requirements of stability and performance specifications of the excitation power supply for the angular measurement system of test turntable, a design method, is presented, in which the robust stability based H_∞ -optimal control theory is applied to the magnitude loop of excitation power supply with closed-loop control. The solving process of the H_∞ controller is discussed. Long period of operation of the four test turntables has proven that the validity and rationality of the design method fully satisfy the requirements of high precision test turntable.

Key words Robust stability, Performance, Closed-loop control, Excitation power supply

曾 鸣: 男, 1957 年生, 教授, 博士, 主要研究方向是控制理论(鲁棒控制, 学习控制等)及其应用, 发表论文二十余篇。

张东纯: 男, 1974 年生, 博士生, 主要研究方向是学习控制。

苏宝库: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是转台控制系统。

沈 毅: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是控制理论及其应用, 多传感器信息融合等。