

利用状态反馈提高伺服系统性能的研究与仿真

杨玉新

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 本文介绍了三种基于现代控制理论的状态反馈的新设计方案, 来提高伺服系统性能。作为比较, 首先用经典控制理论频域法对伺服系统进行了设计, 调试后实验结果表明满足设计要求, 然后应用二次型性能指标函数法全状态反馈方案, 最优传递函数法全状态反馈方案和部分状态反馈方案, 计三种方案对伺服系统进行设计, 并分别进行了计算机仿真。结果表明, 这三种新设计方案无论在动态性能还是静态性能上, 都较经典理论频域法设计方案有很大提高。三种方案中, 又以最优传递函数法部分状态反馈方案最有应用和推广价值。两种全状态反馈方案中, 都用到了龙恩伯格(Luenberger)降维状态观测器, 仿真结果表明是可行的。

1 引言

伺服系统广泛地被用于工业、国防、航天等领域, 如何提高伺服系统的跟踪性能, 是人们多年来一直在努力探讨的问题, 也是在各种应用中对伺服系统跟踪性能的要求越来越高的迫切需要。

目前, 许多控制系统的设计都是采用经典控制理论设计方法来设计的。但是利用现代控制理论方法进行设计的系统数目正在增加, 在许多要求高精度的航天控制系统中, 现代控制理论的方法起到了重要的作用, 本文对利用现代控制理论的状态反馈提高伺服系统性能进行了研究与探讨。

2 经典控制理论设计的伺服系统

作为和后面用现代控制理论设计伺服系统相比较, 文中首先采用了经典控制理论频域法对伺服系统进行了分析与设计, 即分别对速度回路和位置回路进行分析, 并确定出校正环节的参数。

作为伺服系统内回路的速度回路原理图如图1所示。其中功率放大环节采用大功率半导体三极管构成的桥式电路, 速度校正环节采用超前—滞后环节。

速度回路的闭环传递函数可近似为一个振荡环节, 在确定了此环节的各参数值后, 接下来

进行伺服系统外回路——位置回路的设计。

位置回路硬件结构图如图 2 所示。其中两个 DAC0832 分别将控制力矩电机正、反转的数字量转换成模拟量，由多路模拟开关 AD7501 控制它们分别加到位置校正放大环节上。位置校正环节由两个超前——滞后环节串联组成。

位置回路控制软件是用

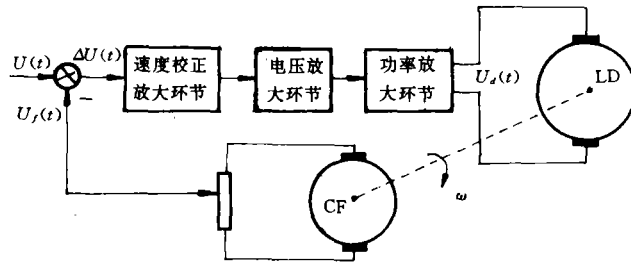


图 1 速度回路原理图

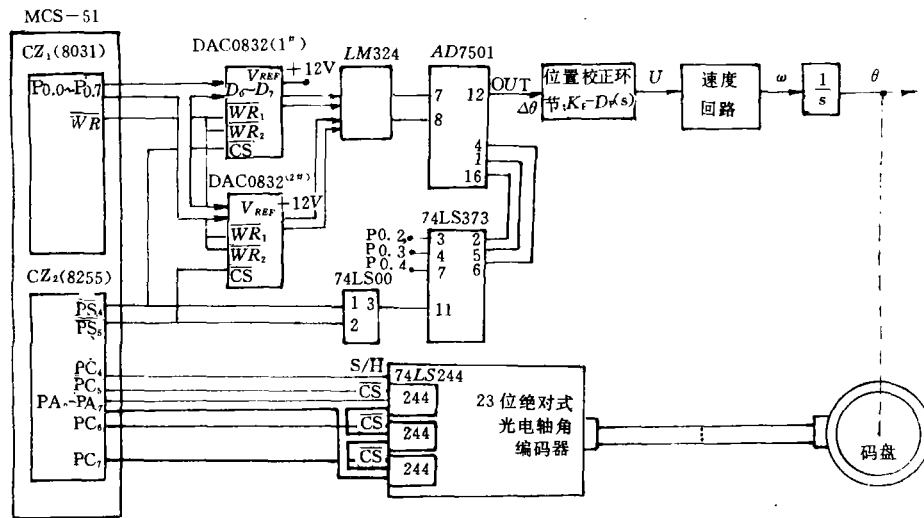


图 2 位置回路硬件结构图

MCS-51 汇编语言编制的，来控制伺服系统工作。

3 现代控制理论设计的伺服系统

要应用现代控制理论设计伺服系统，首先应确定伺服系统的状态变量，由于伺服系统存在严重的机械谐振，因此可将伺服系统原始模型画成图 3 所示。

伺服系统中，比较关键和容易得到的状态变量有五个：(如图 3 中所示) 电机电枢电流 I 、电机角速度 ω_a 和角位移 θ_a 、负载角速度 ω 和角位移 θ 。其中 θ_a 的反馈会降低系统的无差度，这是伺服系统所不希望的，因此希望找到一个新的状态变量代替 θ_a 的反馈而不影响系统的静差度。考虑到 θ_a 和 θ 是通过传动机构的弹性变形产生的弹性力矩作用联系的。而弹性力矩与负载角加速度 ϵ 有关，若采用 ϵ 反馈则是增加系统的阻尼而不会影响系统的静差度，故用 ϵ 代替 θ_a 作状态变量，从而状态变量变为如下五个： I 、 ω_a 、 ϵ 、 ω 、 θ 。通过一些推导，我们确定了伺服系统原始模型结构图如图 4 所示。

本文为提高伺服系统跟踪性能，应用了现代控制理论的三种状态反馈方案，即二次型性能

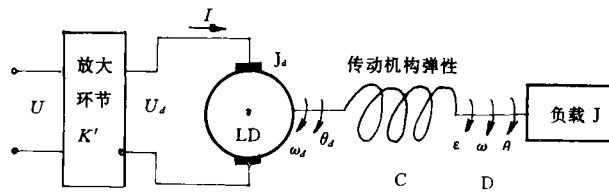


图3 伺服系统原始模型

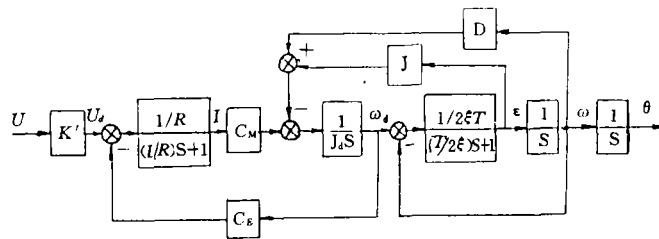


图4 伺服系统原始模型结构图

指标函数法的全状态反馈方案、最优传递函数法的全状态反馈方案和部分状态反馈方案,对伺服系统进行重新设计,并分别进行了计算机仿真和对比研究。

3.1 二次型性能指标函数法全状态反馈方案设计的伺服系统

这种方案中,我们需首先确定系统的状态空间方程。考虑到实际系统对负载角位移 θ 只能是单位反馈,对位置回路的设计仍采用经典控制理论频域法设计,因此这种方案是对速度回路的全状态反馈,因此状态空间方程是由 $I, \omega_d, \epsilon, \omega$ 四个状态变量确定的状态方程和输出方程。

在确定了系统状态空间方程后,经判断系统是既完全能控又完全能观的。这样就为应用此方案设计速度回路做好了准备。

人们目前经常采用,实用性很高的二次型性能指标为

$$PI = \int_{\Delta}^{\infty} (X' Q X + U' Z U) dt$$

它更加适合最优控制设计,广泛地被应用于最优控制设计中。

现代最优反馈控制问题的目的是确定最优控制规律 $U'(X, t)$,使系统从初始状态转移到最终的状态的同时,使所建立的性能指标为最小。由二次型性能指标将求得最优状态反馈控制规律为 $U'(x, t) = -K \cdot X(t)$ 式中 K 是 $m \times n$ 型反馈常数阵。 m 是输入信号个数, n 是系统阶数,显然,实现最优控制,从而使所建立的性能指标最小,关键在于反馈常数阵 K 的求解。经过推导,可得 $K = Z' B' P$ 。其中 z 为加权系数,可以设定, B 为状态方程中矩阵、已确定,而矩阵 P 是黎卡提代数方程 $A' P + PA - PBZ^{-1} B' P + Q = 0$ 的解。在确定 P 的过程中,庆用求矩阵逆的软件和求黎卡提矩阵解的软件。在确定了 P 从而确定了矩阵 K 的值后,即完成了对速度回路的设计。

(1) 全状态反馈伺服系统的设计

如上面所述,位置校正环节仍采用经典控制理论频域法设计,考虑到位置信号跟踪要求既

快又无静差,所以对位置偏差信号进行比例加积分校正。因此,这种方案对伺服系统的设计,可以说是现代控制理论和经典控制理论综合的一种设计方法。

(2)这种方案物理实现上的考虑

上面实现全状态反馈时,假定系统各状态变量 $I, \omega_d, \epsilon, \omega$ 是全部可测的。而在实际中, I, ω, ω 三个是容易测得的,但另外一个即负载角加速度 ϵ 则是难于测量或是难于精确测量的,物理实现时我们应用龙恩伯格降维状态观测器理论对 ϵ 进行重构,用重构得到的 $\hat{\epsilon}$ 来取代 ϵ 进行角加速度反馈。

含有龙恩伯格降维状态观测器的全状态反馈速度回路结构图如图 5 所示。

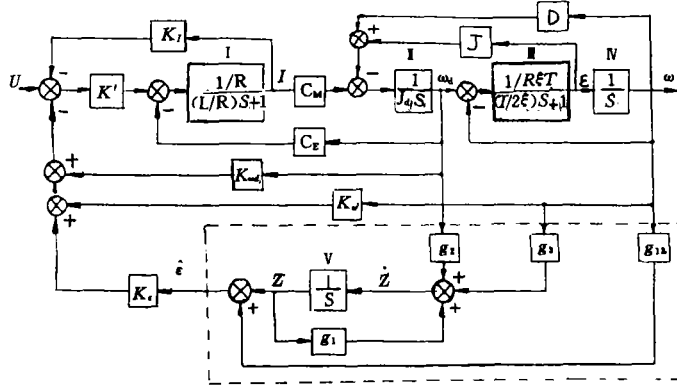


图 5 采用降维状态观测器的全状态反馈速度回路
(虚线框内为 ϵ 观测器)

(3)系统仿真

根据系统结构和特点,应用连续系统结构图法数字仿真软件,对此种方案设计的全状态反馈速度回路、全状态反馈伺服系统及含降维状态观测器的全状态反馈速度回路分别进行了仿真。

3.2 最优传递函数法状态反馈设计的伺服系统

最优传递函数法是一种解析算法,它所依据的指标也是一种积分指标。在系统不变部分的原始模型已确定的情况下,求使性能指标达到最小所对应的最优闭环传递函数,然后综合校正装置,使校正后的闭环系统与最优传递函数相符。

待设计的系统如图 6 所示,其中控制器是一个比例环节, $U(t)$ 是控制量, $W_o(s)$ 是伺服系统不变部分的传递函数,即伺服系统原始模型。

系统的性能指标,即目标函数为:

$$J = \int_0^{\infty} [qe'(t) + U'(t)]dt$$

式中 q 为加权系数,常取成正整数,设计者视具体情况选定。

通过推导,得最优传递函数 Φ_y 表达式

$$\Phi_y = q \cdot [Z/Y]^+ / YZ$$

单位阶跃信号作用下,系统的最优传递函数

$$\Phi_y = [qN(o)N(s)]/[Dy(o)Dy(s)]$$

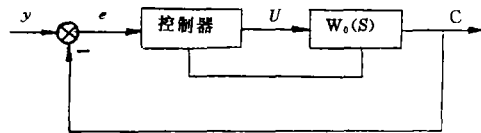


图 6 待设计的系统框图

根据系统精度要求和饱和限制确定 q 值后,又经推导计算得出原系统的最优传递函数。其中,在确定最优传递函数分母多项式系数时,编制了求四元非线性方程组的解的软件。

最优传递函数法设计伺服系统是一步完成的。确定了系统最优传递函数后,我们下面应用最优传递函数法的两种设计方案,即全状态反馈方案和部分状态反馈方案分别对伺服系统进行设计。

3.3 最优传递函数法的全状态反馈方案设计的伺服系统。

只要系统不变部分的状态全部可测,就可考虑采用状态反馈方案,使校正后的系统特性与最优传递函数一致,这种方法计算全状态反馈十分简便,这正是它优越之处。我们这里虽然负载角加速度 ϵ 不可测,但由于采用龙恩伯格降维状态观测器对它进行了状态重构,可用重构得到的 $\hat{\epsilon}$ 代替 ϵ 进行反馈,所以满足上面全部状态可测的条件。

经运用最优传递函数法全状态反馈理论进行推导和计算,确定了最优传递函数法的全状态反馈参数,即完成了系统设计。

这里实现全状态反馈和前面二次型性能指标函数法的全状态反馈一样,在物理实现时采用 $\hat{\epsilon}$ 代替 ϵ 进行角加速度反馈。由于针对同一伺服系统原始模型进行设计,采用同样的理论即降维状态观测器理论重构负载角加速度,因此最优传递函数法全状态反馈伺服系统中,所用的降维状态观测器和二次型性能指标函数法全状态反馈伺服系统中完全相同。

3.4 最优传递函数法部分状态反馈方案设计的伺服系统

全状态反馈虽然易于计算反馈系数,量工程实践中,并非任何情况下都能实现全状态反馈,常常会遇到系统的有些状态变量不易直接测量,采用状态观测器也并非全有效的情况。从降低系统灵敏度来看,状态观测器的使用也应受限制,即采用部分状态反馈在许多情况下是比较合理的。

我们这里考虑状态观测器的使用受限制和无效时的情况,不对角加速度 ϵ 进行反馈,即采用部分状态反馈方案。因此,这时采用部分状态反馈不存在状态重构问题。

由于是部分状态反馈,又要使校正后的系统与最优传递函数相符,因此反馈环节不再只是常系数,而将包含 S 的多项式形式,并且还必须引入 $F_0(s)$ 的反馈才能奏效,如图 7 所示。

根据最优传递函数法部分状态反馈理论设计伺服系统,在确定部分状态反馈环节参数时,还需对所采用的状态变量个数进行确定和讨论。这里讨论后,针对伺服系统原始模型确定采用 3 个状态变量进行部分状态反馈。经推导计算后确定了部分状态反馈的环节和参数,即完成了系统设计。

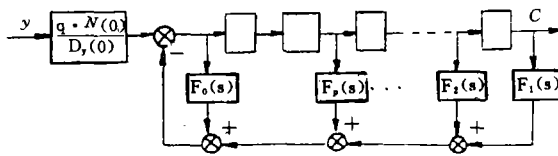


图 7 部分状态反馈示意图

3.5 系统仿真

这里应用连续系统结构图法数字仿真软件,对最优传递函数法全状态反馈方案设计的伺服系统、含降维状态观测器的全状态反馈伺服系统及部分状态反馈方案设计的伺服系统分别进行了仿真。

4 实验和仿真结果及分析

4.1 系统实验结果及分析

本文对经典控制理论设计的伺服系统,进行了具体实现,经反复调试后进行系统实验:

(1)速度回路:通过低速实验,得知系统具有良好的低速特性。通过调速范围和阶跃响应实验,得知系统满足设计要求。

(2)位置回路:用所编制的 51 汇编语言系统控制软件对伺服系统硬件电路进行控制做系统归零实验。当大偏差归零时,系统满足设计要求。

4.2 系统仿真结果及分析

本文对应用现代控制理论设计的伺服系统进行了计算机仿真。

(1)二次型性能指标函数法全状态反馈系统仿真

①全状态反馈速度回路系统仿真

仿真结果表明,全状态反馈速度回路具有良好的动态和静态性能。系统调节时间比经典理论设计的结果提高十倍以上,系统超调 $<5\%$ 。随着加权阵 Q 中的参数 q_1 的增大,全状态反馈深度增大,系统输出角速度变小。

②全状态反馈伺服系统仿真

仿真结果表明,全状态反馈伺服系统具有良好的稳态性能,稳态误差 $<6.19'$,但随着 q_1 的增大,系统的动态性能(t_s 和 $\delta\%$)变坏。当 q_1 较小时,系统仍具有让人满意的动态性能,因此应用二次型性能指标函数法全状态反馈对原系统进行设计并物理实现时,我们可将 q_1 选得较小(如 $q_1=100$),这样设计的伺服系统在具有良好的静态性能的同时,具有良好的动态性能。

③含降维状态观测器的全状态反馈系统仿真

仿真结果表明,负载角加速度 ϵ 和其观测值 $\hat{\epsilon}$ 之间的最大相对误差小于 1% ,这样配置观测器的极点后,用 $\hat{\epsilon}$ 代替 ϵ 进行角加速度反馈,对系统品质影响很小,满足工程设计要求。

(2)最优传递函数法伺服系统仿仿真

①全状态反馈伺服系统仿真

仿真结果表明,最优传递函数法全状态反馈伺服系统具有良好的动态和静态性能,我们将它和二次型性能指标函数法全状态反馈伺服系统的性能相比较,可以发现,前者无论是动态性能,还是静态性能,都要优于后者。

②含降维状态观测器的全状态反馈伺服系统仿真

仿真结果表明,这种方法中的负载角加速度 ϵ 和其观测值 $\hat{\epsilon}$ 之间的最大相对误差 3% ,这样配置观测器极点后,用 $\hat{\epsilon}$ 代替 ϵ 进行反馈,对系统品质影响很小,满足工程设计要求。

③部分状态反馈伺服系统仿真

仿真后,我们比较最优传递函数法全状态反馈方案和部分状态反馈方案这两种方案设计的伺服系统性能,发现它们完全相同。分析原因,是由于最优传递函数法的这两种方案设计的伺服系统具有同一传递函数——最优传递函数,因此两种方案在相同的阶跃信号作用下具有相同的输出。

5 结 束 语

实验结果表明,经典控制理论频域法设计的伺服系统能够满足设计要求。仿真结果表明,

三种现代控制理论的状态反馈方案设计的伺服系统,无论是动态性能还是静态性能,都较经典理论频域法设计的伺服系统性能有很大提高。经过分析比较,我们认为三种状态反馈方案中,又以最优传递函数法的部分状态反馈方案最有应用和推广价值。同时仿真结果还表明,两种方法的全状态反馈方案中,都可以用负载角加速度 ϵ 的观测值 $\hat{\epsilon}$ 来代替 ϵ 进行角加速度反馈。

参 考 文 献

- [1] 熊光楞,《控制系统数字仿真》. 清华大学出版社
- [2] 任兴权,《控制系统计算机仿真》. 机械工业出版社
- [3] 王照林,《现代控制理论基础》. 国防工业出版社
- [4] 阵伯时,《自动控制系统》. 机械工业出版社

Studies and Simulations on Using the State Feedback to Improve the Performance of the Servo-System

Yang Yuxin

(Changchun Institute of Optics and Mechanical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

In this paper, three new schemes, based on State Feedback of the Modern Control Theory, is proposed to improve the performance of the Servo-System with the Frequency-Method of the Classic Control Theory, the experiment result shows that, after adjustment, it can satisfy the design demand. Then we have used the three schemes, the Full-State Feedback scheme of the Linear-Quadratic method, the Full-State and Part-State feedback schemes of the Optimal-Transmit-Function method, to design the Servo-System, and have respectively gone about Computer Simulations. The result shows that all of the three schemes have largely improved the trend-state and static-state performances compared with the Frequency-Method design of the Classic Control Theory. In the three schemes, the Part-State feedback scheme of the Optimal-Transmit-Function method is the most valuable to apply and popularize. In the two Full-State feedback schemes, the Luenberger reduced-order state observer are used, and their simulation results show that it is practicable.