

船载雷达伺服系统带宽测试方法研究

蒋知彧, 丁求启

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 带宽是船载雷达伺服系统的重要指标, 反映了系统的动态性能和跟踪性能; 工程经验公式估算带宽的方法平滑了时域响应曲线的锯齿状波动, 估算结果比实际值偏大; 针对这种情况, 提出了一种基于阶跃响应和傅里叶变换的带宽计算方法, 只需一次阶跃响应即可获得系统的频率特性从而计算系统带宽, 由于不需要额外的激励信号, 测试过程较为简单, 仿真和试验结果表明测试结果与理论结果更为接近。

关键词: 船载雷达; 频率特性; 带宽; 傅里叶变换

Research on Bandwidth Test Method of Ship-borne Radar Servo System

Jiang Zhiyu, Ding Qiuqi

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: The bandwidth is an important characteristic of ship-borne radar servo system, which reflected dynamic characteristic and tracking characteristic. The wave on the time respond curve was smoothed by engineering experience formula, so the result was bigger than real value. According to this situation, this paper proposed a new test method based on step respond and fast fourier transform (FFT), which only need once step respond can getting object frequency characteristic and computing system bandwidth. Because of this method didn't need additional inspirit signal, so the test process was simpler. Simulation and experimental results show that the result was close to real value.

Keywords: ship rocking ship-borne radar; frequency characteristic; bandwidth; FFT

0 引言

带宽是伺服系统能响应的最大正弦波频率, 它是伺服系统的一项重要指标, 反映了系统的动态性能和跟踪性能。伺服系统作为一种信号系统, 类似一个低通滤波器。总是让频率较低的成分通过, 而把频率高的部分衰减掉。因此带宽越宽, 伺服系统的输出跟随输入指令的能力就越强, 系统的快速就越好。船载雷达伺服系统将角误差信号处理放大后反馈给伺服电机驱动天线向减少误差的方向运动, 从而完成对目标的跟踪, 所以船载雷达伺服系统必须具有良好的动态性能和跟踪性能, 即要求系统具有大的带宽。但是随着带宽增大会降低系统抑制噪声的能力, 从而使系统的稳定性变差。因此系统设计时要兼顾快速性和稳定性的需求选择合适的带宽^[1]。船载雷达伺服系统设计完成后需要定期进行性能指标测试, 检验系统指标和设备状态是否正常。建立系统数学模型进而通过解析法计算伺服带宽是分析系统频率特性最准确的方法, 但是工程上复杂的伺服系统很难建立准确的数学模型, 因此采用试验法测试系统带宽在工程实际中就变得十分重要。《交流伺服驱动器通用技术条件》(JBT 10184-2000)规定了系统带宽的定义及标准测试方法。即给系统输入不同频率的正弦波信号, 记录系统输出的波形曲线, 当输出曲线相位滞后增大至 90 度时的频率作为伺服系统 90 度相移的频带宽度或幅值减小至低频时 0.707 倍的频率作为伺服系统 -3 dB 频带宽度。该方法测试精度高、重复性好, 但是测试周期长、效率低, 而且频繁的正弦运动会给伺服系统的机械结构产生不利的影 响。为此工程上简化了测试步骤, 利用经验公式根据时域性能指标计算系统带宽。由于控制系统的

控制参数、传动链的刚度、传动间隙、负载等因素都会对带宽产生影响, 因此经验公式估算系统带宽精度较低。为了提高试验法的测试精度, 许多机构和学者也开展了相关的研究, 如文献 [1] 提出了一种使用调频脉冲扫频信号作为激励信号对系统进行频率特性测试的方法, 调频脉冲扫频信号是一种功率均匀分布且频率随时间线性增加的等幅信号, 由于含有丰富的频率成分因此测试效率较高, 但是该信号对低频的扫频效果较差, 且实际测试中数据采集参数较难配置^[2]。文献 [2] 提出了一种利用白噪声信号作为激励信号的方法, 利用频谱分析对测试结果进行处理得出系统的频率特性。该方法测试过程虽然简单, 但实际的白噪声是由 M 序列信号代替, 因此测试精度低、重复性差^[3]。文献 [3] 提出了利用多频声信号作为激励信号的方法, 该信号是将频率不同但幅值相同的多组正弦信号按照不同相位差叠加后形成的组合正弦波信号, 它可以一次性的呈现控制系统在不同频率处的特性。但信号合成时初相角选择对合成信号峰值有很大的影响, 可能使得叠加后的输入信号在某些时刻幅值远大于单个信号从而超过系统的输入限幅^[4]。鉴于此文献 [4] 提出了一种分段正弦单步法, 即以频率分段的正弦波作为激励信号, 一步完成系统频率特性测试^[5], 文献 [5] 提出了利用多谐差相信号进行频率特性测试的方法, 通过调整合成信号的各分量的初始角来形成周期性多频信号从而解决幅值过大的问题^[6], 但两种测试方法步骤较为复杂, 对激励信号要求较高, 工程实际中较少使用。文献 [6] 提出了一种利用单位脉冲响应测试系统带宽的方法, 但是使用矩形脉动函数近似代替理想脉冲信号导致测试精度不高^[7]。因此, 本文在结合设备实际的基础上, 提出一种利用单位阶跃响应测试船载雷达伺服系统带宽的方法, 通过对系统输出进行傅里叶变换从而快速获取系统的频率特性, 从而计算系统带宽。

1 船载雷达伺服系统数学模型

船载天线驱动单元分为方位、俯仰两条驱动支路, 俯仰支

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2017-12-13。

作者简介: 蒋知彧(1984-), 男, 江苏江阴市人, 工程师, 主要从事航天测控系统方向的研究。

路采用直流电机双链驱动, 方位支路采用直流电机双/四链驱动, 对电机控制采用电消除方式, 在环路设计上采用三环控制^[8]。同时, 为实现电消除, 配置有偏置力矩环、差速抑制环, 保证多电机的受力均匀。方位支路是双电机驱动系统, 为保证高测量精度和高动态性能, 与常规伺服系统设计一样采用典型的三环, 电流环为最内环, 通过改造马达控制器电流控制回路实现; 速度环为中间环路, 为自主设计环路, 它为开环环路, 将速度控制信息、偏置力矩信息、差速抑制信息等合成送给电流环; 位置环为最外层环路, 它为闭环环路, 采用计算机通过设计控制算法实现天线精准控制。由于车载测控设备工作环境特点, 增加了抑制船摇的陀螺环, 在天线特定位置固定 2 个陀螺, 用于感知天线相对基准的转速, 将感应出的电信号经过处理后馈入速度环, 从而实现克服船摇的目的。该系统的结构如图 1 所示。

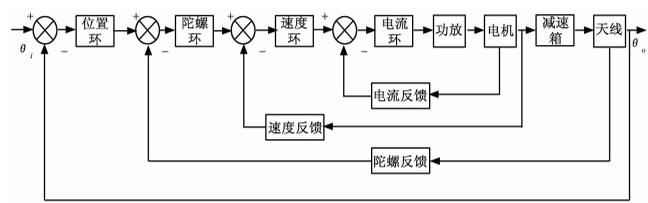


图 1 车载雷达伺服驱动结构框图

由于跟踪环才能体现车载雷达伺服系统的跟踪性能, 因此本文根据系统设计方案和实际情况在 MATLAB 中建立跟踪环的数学模型如图 2 所示。从伯德图可以直接反应系统的频率特性如图 3 所示, 根据带宽的定义可从图 3 中得出系统带宽约为 1 Hz。

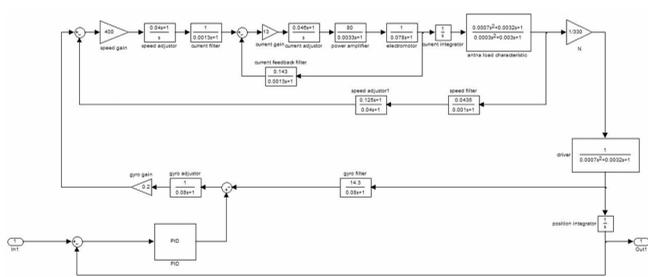


图 2 伺服系统数学模型

2 工程经验公式估算带宽原理分析

车载雷达伺服系统为二阶无静差稳态系统, 下面以典型二阶控制系统估算带宽与时域指标的关系。对于二阶系统, 闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中, ω_n 为自然频率, ξ 为阻尼比。

系统幅频特性为:

$$|\Phi(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4\xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (2)$$

由带宽定义可计算系统带宽为:

$$\omega_b = \omega_n [(1 - 2\xi^2) + \sqrt{(1 - 2\xi^2)^2 + 1}]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

定义系统阶跃响应超调量为 σ , 上升时间为 t_r , 闭环幅频特性截止频率为 ω_c , 系统最大输出幅值为 M_r , 零频时的输出幅值

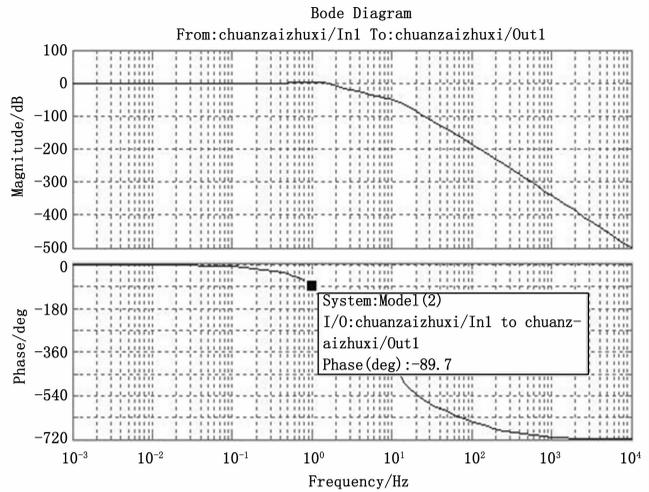


图 3 伺服系统伯德图

为 M_0 , 系统超调后再次降至零频幅值时的频率为 ω_0 。则:

$$\sigma = 41 \ln(M(\omega_0/4)\omega_b M_r / \omega_c M_0 + 17) \quad (4)$$

$$t_r = \frac{13.6 \frac{\omega_b M_r}{\omega_c M_0} - 2.51}{9.56 \omega_c} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2})^2 + 4\xi^2 \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2}}} = 0.5 \quad (6)$$

当系统超调量大于 10% 时, 满足以下近似关系:

$$\sigma\% = 0.1 + 0.4(M_r - 1) \quad (1 \leq M_r \leq 1.8) \quad (7)$$

$$t_r = 2[2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2] / \omega_c \quad (8)$$

由式 (6) ~ (8) 可得出:

$$\omega_b = \frac{1.8 - 5\sigma\%/4 + 125(\sigma\%)^2/8}{\sqrt{(4(1 - 2\xi) + 4\sqrt{(1 - 2\xi)^2 + 3}/(1 - 2\xi) + \sqrt{(1 - 2\xi)^2 + 1})}} \quad (9)$$

由式 (7) 可知式 (9) 理论上只适用于超调量在 [10, 48] 之间的情况, 但在工程应用范围内可证明带宽 ω_b 与超调量 σ 存在递增关系, 因此式 (7) 可推广到 σ 为 [10, 100] 的条件下使用。

对于典型二阶系统, 由于 $\xi = |\ln(\sigma\%)/\sqrt{(\ln(\sigma\%))^2 + \pi^2}|$, 因此可得出:

$$\omega_b = \frac{0.35}{t_r} \quad (\sigma\% \geq 10\%) \quad (10)$$

当系统超调量小于 10% 时, 可知系统极大值发生在 ω 为零的位置, 此时系统无超调, 由式 (4) ~ (6) 可得:

$$\omega_b = e^{-17/41} (13.6 \times e^{-17/41} - 2.51) / t_r / 9.56 = 0.45 / t_r \quad (\sigma\% < 10\%) \quad (11)$$

通过 Matlab 的 Simulink 模块对车载雷达伺服系统进行阶跃特性仿真, 结果如图 4 所示。从图中可见上升时间为 0.21 s, 超调量大于 10%, 因此根据经验公式估算系统带宽为:

$$\omega_b = \frac{0.35}{t_r} = \frac{0.35}{0.21} = 1.67 \text{ Hz}$$

公式 (10) 和 (11) 只适用于控制系统幅频特性曲线没有极大值或者只有一个极大值的情况, 但是车载雷达伺服系统受机械传动结构、模拟电路的影响, 实际的幅频特性曲线存在着无数多

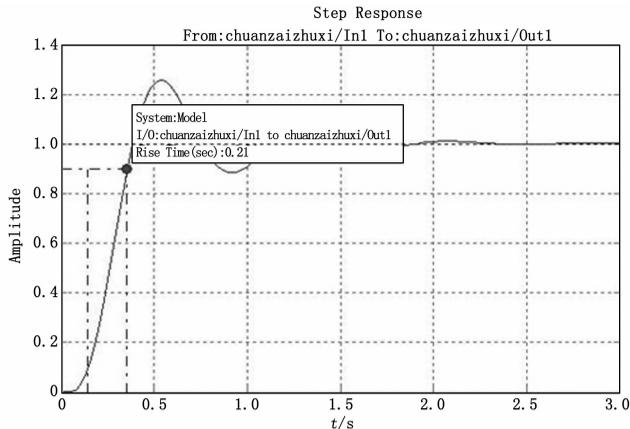


图 4 系统阶跃响应仿真曲线

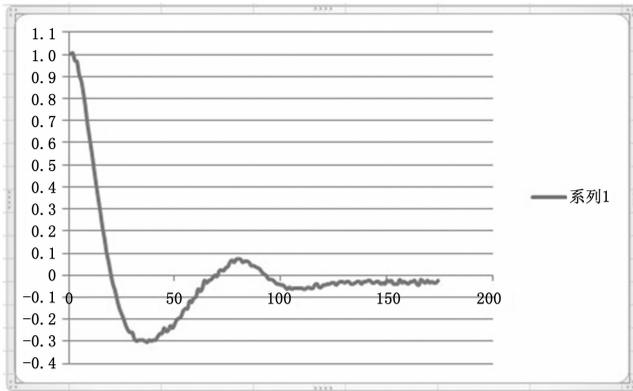


图 5 系统的阶跃响应实测曲线

个极值点。因此该公式等同于将实际时域响应曲线中的锯齿状波动进行了平滑处理，由此估算的带宽将比实际带宽要大。

3 基于阶跃响应的估算方法

对系统进行阶跃测试，利用傅里叶变换可以快速的获取系统的频率特性，从而计算系统带宽。假设系统的输入响应为 $x(t)$ ，输出响应为 $y(t)$ ，则系统的传递函数为 $G(s) = Y(s)/X(s)$ ，频率特性为 $G(j\omega) = Y(j\omega)/X(j\omega)$ 。通过傅里叶变换可以很容易的将系统的时域特性变换为频率特性，但是在实际测试过程中，输入的阶跃响应和系统的输出稳态值都不为零，导致 $f(t) = y(t)/x(t)$ 的傅里叶积分不可积，因此在傅里叶变换之前必须滤除系统输入输出中的稳态直流分量，使得系统输入和输出的初始值为零。假设 $\dot{x}(t), \dot{y}(t)$ 为系统输入和输出经过滤波器以后的信号，对 $\dot{x}(t), \dot{y}(t)$ 进行傅里叶变换可得：

$$\begin{aligned}
 Y(j\omega_i) &= FFT[\dot{y}(KT)] = T \sum_{K=0}^{N-1} \dot{y}(KT) e^{-j\omega_i KT} \\
 X(j\omega_i) &= FFT[\dot{x}(KT)] = T \sum_{K=0}^{N-1} \dot{x}(KT) e^{-j\omega_i KT}
 \end{aligned} \quad (12)$$

式中， N 为采样点数， T 为采样周期， $i = 1, 2, \dots, N/2$ 。

系统的频率特性为：

$$G(j\omega_i) = \frac{Y(j\omega_i)}{X(j\omega_i)} = \frac{G_f(j\omega_i)Y(j\omega_i)}{G_f(j\omega_i)X(j\omega_i)} = \frac{Y(j\omega_i)}{X(j\omega_i)} \quad (13)$$

式中， $G_f(j\omega_i)$ 为滤波器的频率特性。

由此可见，阶跃响应经过滤波后的频率特性仍然是由系统输入输出的频谱确定的，滤波器的加入只是解决了傅里叶积分的可积性，不会改变系统的频率特性。

4 试验验证

以方位支路为例对某船载雷达伺服系统进行跟踪环阶跃测试。阶跃输入由伺服主控软件通过跟踪加偏的方式产生，记录系统误差电压的输出。按照工程经验绘制系统的阶跃响应曲线如图 5 所示。

从图中可得系统上升时间为 0.225 s，超调量为 30%，因此系统带宽为 $0.35/0.225 = 1.6$ Hz。与仿真结果较为接近，验证了系统模型的正确性。

MATLAB 的信号处理函数工具箱含有许多信号处理的工具，通过 FFT 函数可以很容易的实现傅里叶变换。由于伺服主控计算机的存盘周期为 25 ms，对应的频率远大于系统频率，因此傅里叶变换的采样周期设置为 40 Hz。对系统输出经

FFT 变换后的幅频特性曲线如图 6 所示。由此可计算系统带宽为 $2\pi/1.9\pi = 1.05$ Hz，与理论值更为接近。

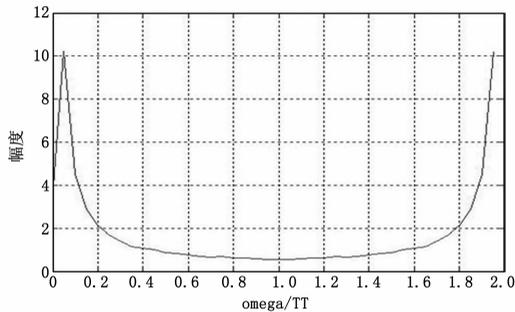


图 6 系统幅频特性曲线

5 总结

带宽是船载雷达伺服系统的重要指标，反映了系统的跟踪性能和动态性能。工程经验公式估算系统带宽时由于将实际时域响应曲线中的锯齿状波动进行了平滑处理，因此估算的带宽将比实际带宽要大。本文提出了一种利用系统阶跃响应和傅里叶变换获取频率特性的方法，只需一次试验即可以快速的计算系统带宽，该方法不需要额外产生激励信号，测试过程简单，仿真和试验结果表明该方法测试结果更接近理论值。

参考文献：

- [1] 刘锡明, 刘立人, 孙剑锋, 等. 星间激光通信中复合轴系统的带宽设计研究 [J]. 光学学报, 2006, 26 (1): 101-106.
- [2] 汪首坤, 王军政. 基于调频脉冲扫频的导弹舵机频率特性测试方法 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26 (8): 697-699, 703.
- [3] 潘良高, 王经甫. 电液伺服系统频率特性测试系统的设计 [J]. 自动化技术与应用, 2009, 28 (3): 93-95.
- [4] 雷鹏飞, 李 军. 基于 Multitone 信号的伺服系统频率特性测试 [J]. 工业控制计算机, 2016, 29 (1): 41-43, 45.
- [5] 唐 波, 唐小奇, 宋 宝, 等. 基于 HNC-8 数控系统伺服频率特性测试系统的研究与实现 [J]. 机床与液压, 2012, 40 (21): 1-3.
- [6] 陈连华, 赵 娜, 王奕博, 等. 一种快速单步的频率特性测试方法 [J]. 电子测量技术, 2011, 34 (2): 77-79, 101.
- [7] 张东云, 殷新华, 张 鑫, 等. 基于单位脉冲响应的伺服系统带宽仿真研究 [J]. 现代防御技术, 2015, 43 (4): 210-214.
- [8] 潘高峰, 周江. 船载雷达伺服系统的建模与仿真 [J]. 电子工程师, 2007, 33 (6): 7-9.