

跟踪雷达天线随动系统的反馈校正及特性改善

张大彪, 王艳菊, 刘万明

(河北师范大学, 河北 石家庄 050031)

摘要:文中介绍了跟踪雷达天线随动系统的电路组成,建立其数学模型,利用 MATLAB 语言完成了动态仿真。详细分析了反馈校正环节对系统特性的改善,为天线随动系统提供了调试数据。

关键词:跟踪雷达; 随动系统; 校正; MATLAB

中图分类号: TM212 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2003)01-0001-04

Feedback Correction and Characteristic Improving for Antenna Servo System of Tracking Radar

Zhang Dabiao, Wang Yanju, Liu Wanming

(HeBei Normal University, Shijiazhuang 050031)

Abstract: This paper introduces the circuit form for antenna servo system of tracking radar. The mathematics model is established. The dynamic simulation has been accomplished by using MATLAB language. It is analysed in detail that feedback correction link can improve the system characteristic. The adjusting data of antenna servo system is provided.

Key Words: Tracking Radar; Servo System; Correction; MATLAB

1 引言

天线随动系统又称伺服系统,是跟踪雷达的一个重要组成部分。通过它可实现对空中目标快速、准确地跟踪。随动系统是由控制电机为主要元件组成的一种自动控制系统。本文在简要介绍其电路组成的基础上,用目前控制系统广泛采用的 MATLAB 语言对天线随动系统进行建模与仿真。并重点分析速度反馈元

件在系统中的作用及最佳反馈系数的确定方法。

2 跟踪雷达天线随动系统的电路组成及数学模型

天线随动系统由精、粗双支路自整角机、综合级、鉴相器、直流放大、执行电机、测速电机、转矩限制电路及减速器组成,如图 1 所示。

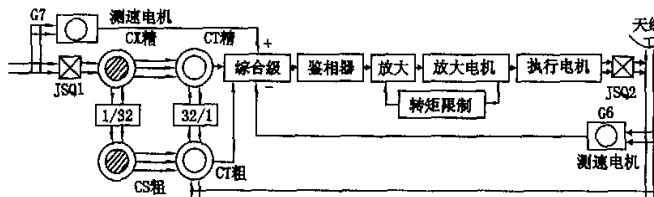


图 1 天线随动系统电路组成

经归纳化简后的结构图如图 2 所示。

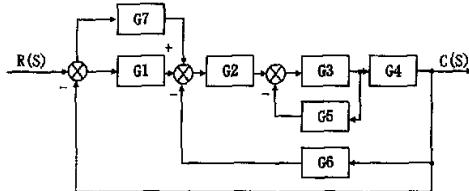


图 2 天线随动系统结构图

将各部分传递函数代入, 经过变换、化简后, 得到

闭环传递函数为:

$$SYS = C(S)/R(S)$$

$$\begin{aligned} &= (29315s^2 + 1.055e005s + 8.603e004) / \\ &(0.003988s^5 + 7.502s^4 + 876.9s^3 + \\ &2.95e004s^2 + 1.055e005s + 8.603e004) \quad (1) \end{aligned}$$

3 系统稳定性分析与特性改善

线性定常系统稳定的数学定义是系统闭环特征方程的全部根均为负值。为此, 利用 MATLAB 中的函数 roots() 对闭环系统“SYS”的特征方程求全部根。

即: $\text{roots}(\text{sys}, \text{den}[1])$ 可得出: $\text{ans} = -1758.3; -59.4 + 14.3i; -59.4 - 14.3i; -2.47; -1.2$

计算结果表明, 特征根的实部均为负值, 所以判定闭环系统是稳定的。系统稳定只说明追摆振荡是衰减的, 要满足天线指标要求(超调量小于 3%; 进入 2% 的调整时间小于 0.5s), 必须进一步调整测速电机的负反馈系数。由于追摆振荡是由转矩滞后造成的, 而速度负反馈电压产生的转矩与控制电压产生的转矩合成结果是超前失调角的, 所以, 采用速度负反馈, 并将系数调到最佳状态, 可有效地抑制追摆振荡, 改善随动系统性能。为此, 使用 MATLAB 中的 `step()` 命令, 分别取负反馈系数 K_- 为 0.135、0.269、0.325、0.359、0.465, 做出闭环系统“sys”的阶跃响应曲线如图 3 示。

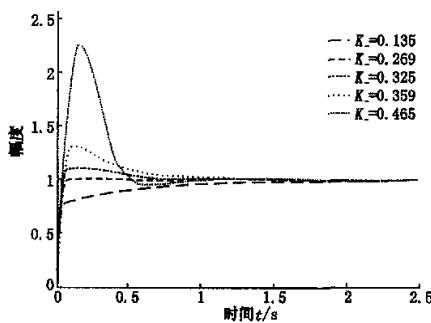


图 3 不同负反馈系数时的阶跃响应曲线

从图中可见, 当 $K_- = 0.135, 0.269, 0.325$ 时, 系统为欠阻尼状态, 阶跃响应存在较大的超调过冲, 不能满足系统指标要求。而 $K_- = 0.465$ 为过阻尼状态, 阶跃响应调整时间增长, 反应速度慢, $K_- = 0.359$ 时为微弱欠阻尼状态, 具有较好的阶跃响应性能, 可满足调整时间和超调量的要求。为此可通过综合级的电位器调整负反馈系数为 0.359。

速度负反馈的采用还能减弱外界干扰对天线正常转动的影响。如正常转动时突然遇到阵风, 使天线转速降低, 则负反馈电压亦减小, 相对控制电压作用增强, 增大了执行电机转矩, 使天线转速回升, 从而消弱了阵风的影响。在 $K_- = 0.359$ 的条件下, 利用 `bode()` 和 `margin()` 命令做出波特图并计算出系统主要指标如表 1, 与调整前相比, 性能得到了明显改善。

表 1 系统主要指标

	幅值稳定裕度 G_m /dB		相角稳定裕度 P_m /deg		超调量 Sigma/%	峰值时间 t_p /s	调节时间 t_s /s
	校正调整前	29	67.5	10			
校正调整后	34.6	72.8	1	0.101	0.101		

4 系统精度分析与特性改善

天线随动系统的精度是以静态误差和动态误差来衡量的。

4.1 产生静态误差的原因及克服办法

产生静态误差的原因有以下几种:

- (1) 精示自整角机的失灵区;
- (2) 执行电机轴上的静摩擦力矩;
- (3) 正、负反馈测速电机零速电压;
- (4) 直流放大器零点漂移;
- (5) 放大电机剩磁。

其中(2)~(5)项可以通过调整综合级精示电位器解决, 调大精示电位器能增大单位失调角输入到系统有效误差电压, 可使静态误差减小。

由自整角失灵区引起的静态误差通过采用双支路失调电压检测系统后, 可使此项静差大大减小, 对于速比为 32:1 的系统, 其静差可以减小 32 倍(单支路静差: $\pm 15'$)。达到 $\pm 0.47'$ (指标要求静态误差小于 $6'$)。

4.2 产生动态误差的原因及校正方法

天线随同步发送机连续转动时, 两者之间总存在失调角, 即动态误差。动态误差除了包括静态误差外主要由速度误差、加速度误差组成。

4.2.1 速度误差

天线和同步发送机转子同步连续转动时, 转速越大, 误差电压和失调角越大, 若系统无静差, 恒速转动时, 误差角 θ 就等于速度误差 θ_V , 且 $\theta_V = C\Omega_i$, Ω_i 为发送机转速, C 为结构系数。由随动系统结构图可得到:

$$C = \frac{1 + K_2(K_- - K_+)}{K_1 K_2} \quad (2)$$

式中: K_1 为精示自整角机传递系数; K_2 为鉴相、放大、执行电机、减速器传递系数; K_+ 为正反馈测速电机传递系数; K_- 为负反馈测速电机传递系数。

在天线随动系统的设计中, 希望 C 为零, 使速度误差等零。在实际系统中, 通过调整速度正反馈电机的传递系数使 K_+ 与 K_- 尽量接近, 天线与同步发送机转子同步。由上面分析可以看出, 选取适当的 K_+ , 使天线匀速转动时与 K_- 抵消, 可以有效地克服速度误差。上述分析可用 MATLAB 仿真。由于 MATLAB 语言中没有直接求解速度响应及误差的函数, 可将闭环传递函数“SYS”除以拉氏算子“S”, 再用求解阶跃响应的命令 `step()` 可求解出其速度响应, 为计算速度误差, 还需绘制出单位速度信号曲线 “ $R(t) = t$ ”, 取单位阶跃响应与 $R(t)$ 之差即可得到速度误差。在程序中, 固定 $K_- = 0.359$, K_+ 在 0.35 范围以 0.020 等间隔值时, 得到“速度响应”、“速度误差响应”, 并做出速度误差随正反馈系数变化的曲线如图 4 所示。

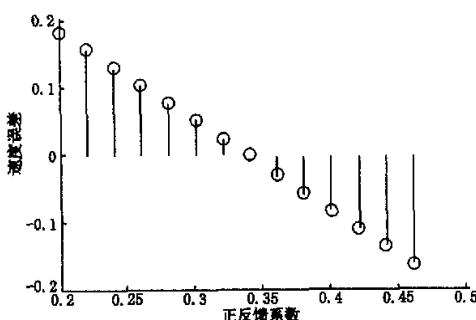


图 4 速度误差随正反馈系数变化的曲线

从图 4 可看出, 当 K_+ 为 0.351 时, 速度误差 $\theta_V = 0.0009$, 近似为零, 若按天线最大跟踪速度 $9^\circ/\text{s}$ 计算, 实际速度误差为 $0.49'$, 因此, 可暂定为 $K_+ = 0.351$ 。

4.2.2 加速度误差

当雷达所跟踪的目标作机动飞行时, 天线需用一

(上接第 37 页)

极管与铁氧体磁珠, 如图 5 所示。这样脉冲信号在进入 A/D 转换器之前先被滤除, 防止了脉冲信号的振幅超过电源电压而损害零件, 保护 A/D 不受损坏。

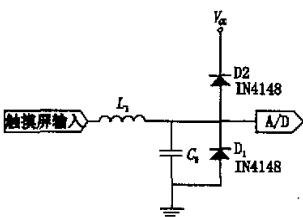


图 5 对 A/D 的输入保护措施

6 结论

针对四线电阻式触摸屏的接口技术, 设计了触摸屏与内嵌 A/D 的单片机接口和与专用 A/D 的接口技术以及 A/D 输入通道的保护技术等, 并在智能仪表研制中应用。实际应用表明: 电路稳定可靠, 简单实用。

参 考 文 献

- Skip Osgood, CK Ong, Rick Downs. TOUCH SCREEN CONTROLLER TIPS. BURR - BROWN APPLICATION BULLETIN, 2000.
- BURR - BROWN INC. ADS7843 DATA SHEET, 1998.
- 施保华, 金晓波, 秦娟英. DSP 芯片与触摸屏的接口控制. 电子技术应用, 2001(1): 65 - 66.

定的加速度跟踪目标。仿照分析速度响应与速度误差的方法, 可求其单位等加速度响应与其误差响应函数, 做出加速度误差随正反馈系数 K_+ 变化的曲线, 分析发现, 随着 K_+ 取值不同, 加速度误差与速度误差有着相同的变化规律, 因此, 可进一步确定 K_+ 取 0.351, 可使加速度误差为最小。其数值为 0.1762, 当天线角加速度为 $0.5^\circ/\text{s}$ 时, 此项误差为 $5.3'$, 与前面计算出的速度误差加在一起为 $5.79'$, 比动态误差上限 ($12'$) 减少 $6.21'$ 。

将动态仿真结果应用于实际天线随动系统, 通过调整两个测速电机的传递系数, 可以最大限度地减小误差提高跟踪精度。

参 考 文 献

- [1] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算与仿真. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 王顺晃, 舒迪前. 智能控制系统及应用. 北京: 机械工业出版社, 1999.

(上接第 42 页)

图 8 中还应用了 AM400 作为工业标准输出电路。它不仅可提供给 CAV424 的工作电压, 也为微处理器提供工作电压, 并且整个电路系统是受到过载短路保护和极性保护的。详细内容可见^[5]和^[6]。

4 总结

本文介绍了电容式信号测量的一种方法。CAV424 作为一个新型的外围元件少、电路简单的电容式信号检测集成电路, 在工业应用中具有较大的灵活性和适用性, 既能与微处理器组成一个完整的高精度的测量系统, 又能与变送电路组成工业上常用的检测系统。在目前电容式传感器中, 比如电容式压力传感器、电容式湿度传感器、电容式液位仪和开关、电容式加速度和角度仪、电容式位移传感器等等都有其应用前景。

参 考 文 献

- [1] Homepage der Analog Microelectronics GmbH; <http://www.analogmicro.de/>
- [2] 产品说明 CAV424; <http://www.analogmicro.de/products/sheets/german/cav424.pdf>
- [3] 传感器的信号处理电路; <http://www.analogmicro.de/products/info/german/pr1007.pdf>
- [4] Atmel 公司的产品; <http://www.IneltekMitte.de/>
- [5] 模数一体化的传感器信号处理方法; <http://www.Frame-ASIC.de/>
- [6] 电容式信号的数字化修正; <http://www.analogmicro.de/products/info/german/pr1008.pdf>

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>