

一种相控阵天线转台伺服控制系统设计

孙天华, 马纪军, 贾建辉, 张 雪
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对相控阵天线测控系统小型化的需求, 提出一种相控阵天线转台伺服控制系统设计方法, 采用集成化的设计思想, 将伺服控制系统集成到转台内部。系统设计有波束控制器, 具有波束控制功能和自动跟踪目标的功能, 以及利用网络通信方式实现对多套伺服控制系统的远程控制功能。系统的伺服控制器采用参数自适应模糊PID控制结合时间最优控制的复合控制算法, 阶跃信号、正弦信号测试和跟踪测试结果表明, 伺服控制系统具有优异的动态性能和较高的跟踪精度。该伺服控制系统功能丰富, 控制性能良好, 具有广阔的应用前景。

关键词: 相控阵天线; 转台; 伺服控制; 波束控制; 模糊PID

中图分类号: TN820.3; TN821+8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)02-0073-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221102001

引用格式: 孙天华, 马纪军, 贾建辉, 等. 一种相控阵天线转台伺服控制系统设计[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 73-80.

Design of servo control system for phased array antenna turntable

SUN Tianhua, MA Jijun, JIA Jianhui, ZHANG Xue
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: According to the requirement of miniaturized phased array antenna TT&C system, a design method of servo control system for phased array antenna turntable is presented, which adopts the integrated design idea. The servo control system is integrated in the turntable. The system with a beam controller includes the function of controlling the antenna beam and automatically tracking the target, the remote control of multiple servo control systems can be realized through network communication. The servo controller of servo control system adopts the compound control algorithm of the parameter self-turning fuzzy PID algorithm and time optimal algorithm. The results of step signal, sinusoidal signal and tracking test indicate that the servo control system has excellent dynamic performance and high tracking precision. This servo control system has rich functions, good control performance and broad application prospects.

Keywords: Phased array antenna; Turntable; Servo control system; Beam control; Fuzzy PID

Citation: SUN Tianhua, MA Jijun, JIA Jianhui, et al. Design of servo control system for phased array antenna turntable[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 73-80.

引 言

随着航天技术和导弹武器系统的发展, 测控系统面临着机动性作战和多目标跟踪测控的任务需求。小型化的相控阵天线测控系统设备集成程度高、体积小、易于运输, 利用多波束相控阵天线可以同时实现对多个目标的测控, 可以满足机动性作战和多目标跟踪测控的任务需求。相控阵天线测控系统小型化是测控系统的一个重要发展方向^[1,2]。

集成化的相控阵天线转台伺服控制系统是实

现相控阵天线测控系统小型化的重要措施。传统的伺服控制系统体积较大, 伺服控制器和伺服驱动器一般在机柜内设计独立的机箱, 系统集成度差, 使得相控阵天线测控系统不易机动。本文提出的相控阵天线转台伺服控制系统设计方法, 采用集成化的设计思想, 将伺服控制系统集成到转台内部。其中控制器和驱动器设计成模块, 减小体积, 安装到转台方位台面上, 波束控制器设计集成在相控阵天线下面, 满足了小型化相控阵天线测控系统对伺服控制系统集成化的要求, 在有限的空间内不仅实现了传统伺服控制系统的各种

功能, 并且可以控制相控阵天线的电波束指向, 用电波束跟踪目标。

1 伺服控制系统总体设计

本文设计的伺服控制系统由伺服控制器、方位/俯仰伺服驱动器、波束控制器、方位/俯仰电机、方位/俯仰转动机构、方位/俯仰轴角编码器、转台安全保护开关以及电子水平仪和寻北定位设备等部分组成^[9]。相控阵天线转台伺服控制系统组成如图 1 所示, 相控阵天线安装在转台俯仰支臂

上, 俯仰轴角编码器、俯仰转动机构、俯仰电机安装在转台俯仰轴上, 伺服控制器、方位/俯仰伺服驱动器、电子水平仪和寻北定位设备安装在转台方位台面上, 方位轴角编码器、方位转动机构、方位电机安装在转台方位轴上, 波束控制器设计集成在相控阵天线下面, 设备全部安装在转台内部, 实现转台机械结构和伺服系统集成化、一体化设计。所有的控制器和部件均采用小型化、模块化结构设计, 满足转台伺服系统对于尺寸和体积的要求。

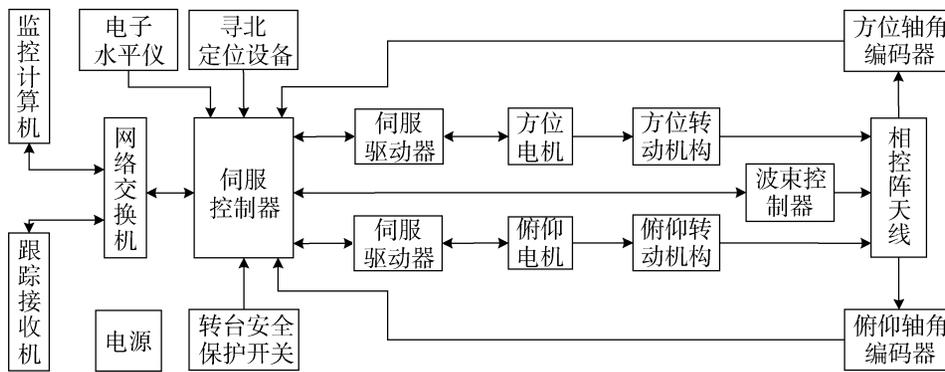


图 1 相控阵天线转台伺服控制系统组成

Fig.1 Form of servo control system for phased array antenna turntable

伺服控制系统利用网络交换机与监控计算机和跟踪接收机通信, 获取控制命令、角误差电压等信息, 控制相控阵天线指向目标空域, 跟踪目标, 完成对目标的测控, 同时将工作状态、角度、姿态、定位等信息上报至监控计算机, 用于状态监控。

本文设计的伺服控制系统可以控制转台方位俯仰机械轴转动, 同时可以利用波束控制器控制相控阵天线波束, 因此有机轴跟踪、机械轴指向、电波束跟踪和电波束指向 4 种主要的工作模式。相控阵天线电波束扫描范围可以设计成 $\pm 60^\circ$, 配合转台机械轴方位支路 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、俯仰支路 $0^\circ \sim 90^\circ$ 运动, 可实现全空域电扫范围内多目标同时跟踪。

本文设计的网络通信方式可以实现对多套伺服控制系统的远程控制, 监控计算机可以利用网络交换机与多套相控阵天线转台伺服控制系统进行通信, 相控阵天线转台可以部署到目标靶标区、岛屿等环境恶劣危险的地区, 利用远程控制, 实现无人值守操作, 通过合理调度, 同时完成多套相控阵天线测控系统的测控任务, 相控阵天线转台的远程分布式应用场景如图 2 所示。

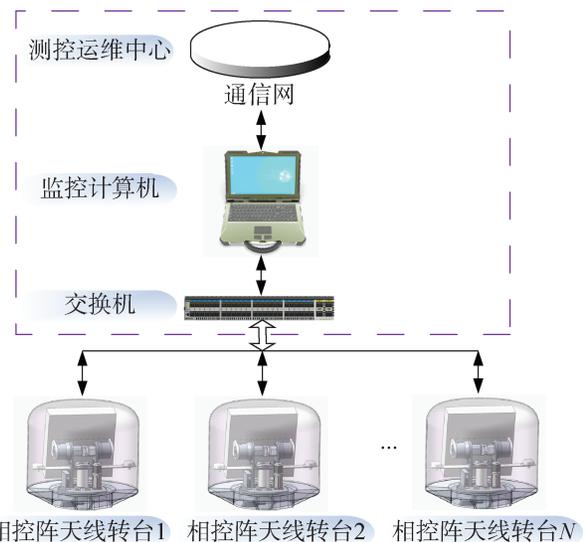


图 2 相控阵天线转台的远程分布式应用场景

Fig.2 Remote distributed application of phased array antenna turntable

2 伺服控制系统关键技术

2.1 嵌入式伺服控制器设计

转台伺服控制系统在尺寸、体积和功耗等方

面要求严格, 常规的天线伺服控制器采用工控机的形式, 最小体积尺寸为2U机箱, 无法满足使用需要。嵌入式系统相比通用工控机具有集成度高、体积和功耗小的优点, 所以本系统的伺服控制器设计为一块基于嵌入式微处理器的集成电路板模块, 通过功能划分, 结合空间合理布局减小控制器整体体积, 在实现控制器的各种控制功能的前提下, 使控制器的尺寸仅为90 mm×70 mm×14.6 mm, 满足转台对伺服控制器的结构尺寸要求。

伺服控制器组成如图3所示, 分为处理器模块、接口模块和电源模块。处理器模块选择嵌入式芯片GD 32F407VGT6作为伺服控制器核心, 该芯片基于ARM Cortex-M4处理器, 具有高性能低功耗的特点, 外围电路包括晶振、程序加载和复位电路, 实现信息采集接收、计算处理、发送、系统工作模式和流程控制等功能。接口模块用于处理器模块与外部设备的信息交互, 包括通信隔

离芯片、光耦隔离芯片、RS232收发器、RS422收发器、CAN收发器、网络模块、SSI接口。通信隔离芯片和光耦隔离芯片作用是抗干扰和保护处理器芯片。伺服控制器通过RS232收发器接收电子水平仪和寻北定位设备的信息; 通过RS422收发器实现与波束控制器的通信; 通过CAN收发器实现与方位俯仰支路驱动器的通信; 网络模块采用USR-K7模块, 实现以太网-串口转换, 通过网络交换机实现与监控计算机和跟踪接收机的通信; 轴角编码器为SSI接口, 利用GD 32F407VGT6芯片的SPI接口模拟SSI接口与方位和俯仰编码器进行通信, 采集方位轴角编码器与俯仰轴角编码器的天线角度位置信息; 光耦隔离芯片完成转台运行上、下限位等安全保护开关信号的隔离接收。电源模块接收外部24 V供电, 转变为5 V和3.3 V, 5 V用于接口模块供电, 3.3 V用于处理器模块供电。

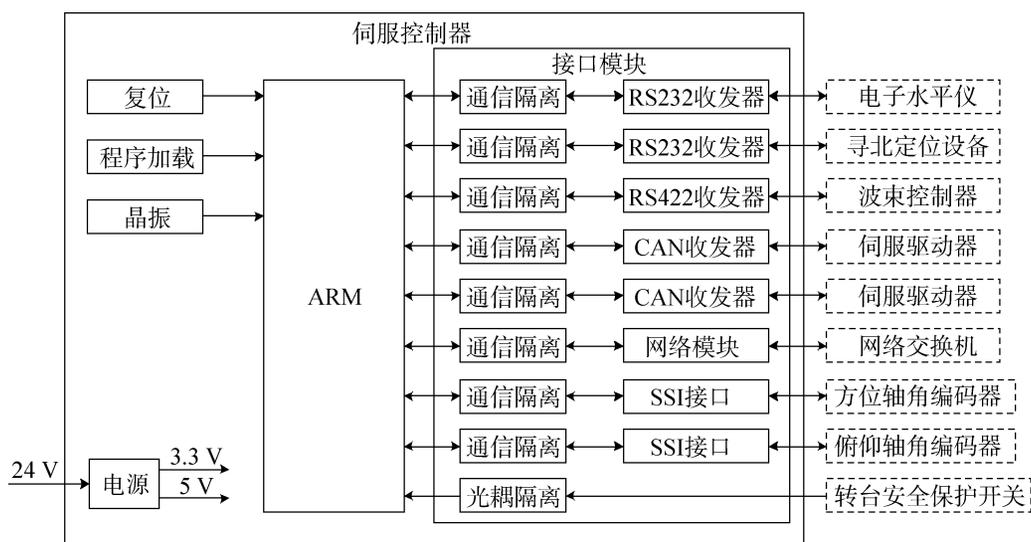


图3 伺服控制器组成及信号流程

Fig.3 Composition and signal flow of servo controller

伺服控制器处理器模块软件工作流程如图4所示。设备加电后, 进行初始化, 然后执行10 ms定时中断子程序, 在中断子程序中读取监控计算机的控制指令、跟踪接收机的角误差信息和转台的状态信息, 再根据监控计算机的控制指令进行工作模式的选择, 执行相应环路的控制算法, 计算出伺服驱动器的控制量和波束控制器的指向角, 通过串行接口模块发送给伺服驱动器和波束控制器, 然后回到主程序中判断程序。

2.2 集中式波束控制器设计

相控阵天线阵列的波束控制功能由波束控制器完成, 实现相控阵天线电波束指向控制功能从而跟踪目标^[4,5]。波束控制器根据伺服控制器送来的指向角信息计算出相应的波控码, 同时完成相控阵天线修正码装订和存储功能^[6]; 波束控制器通过TTL接口, 将波控码按照协议发给相控阵天线R组件, 进而控制R组件移相器的移相角度和衰减器的衰减量, 实现波束在空间的扫描和跟踪, 同时通过串口上报自身工作状态信息。大型相控阵天

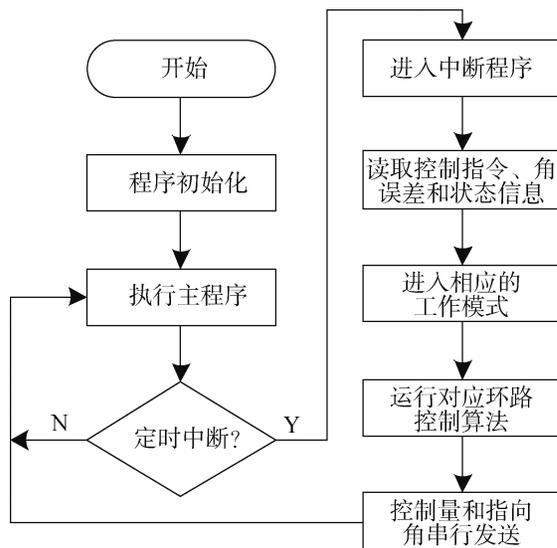


图 4 ARM 软件工作流程

Fig.4 Software operation flow of ARM

线阵元数量多，一般情况会把天线阵元分为若干个子阵，通常采用分布式波束控制器，及每个子阵有单独的波束控制器控制波束^[7]。针对小型转台相控阵天线，设计集中式波束控制器，天线阵面阵元的波束控制统一由一个波束控制器完成，再通过接口发送到各个天线阵元 R 组件上。本文设计的波束控制器体积仅为 60 mm×50 mm×16.5 mm，集成在相控阵天线下面，与相控阵天线在结构上形成一个整体。

波束控制器具体的组成如图 5 所示，主要包含以下模块：处理器模块、接口模块和电源模块，设计接口模块的连接器集中分布到电路板的一侧，占用电路板空间小。处理器模块的核心器件是一片高性能 FPGA，用以快速实现波控码的计算，FPGA 体积小，有丰富的 IO 资源，满足集中式波束控制器的接口要求；FPGA 外围电路包括晶振、程序加载和 FLASH 存储器。FPGA 通过 RS422 收发器和通信隔离芯片接收伺服控制器发送的波束指向角信息，在内部完成波控码的计算；同时，从外部 FLASH 存储器中读取波控修正码完成对相控阵天线幅相不一致的校正。计算完成后，FPGA 将波控码及功放开关控制等指令通过 TTL 接口送给各相控阵天线阵列 R 组件。电源模块接收外部 24 V 供电，转变为 5 V、3.3V 和 1.2 V，5 V 用于接口模块供电，3.3 V 和 1.2 V 用于处理器模块供电。

波束控制器通过空间布局和小型化设计实现和相控阵天线在结构上的一体化，整体结构简洁，

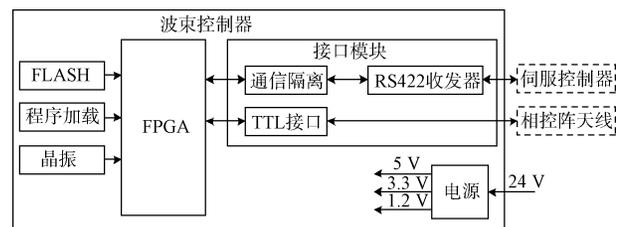


图 5 波束控制器组成及信号流程

Fig.5 Composition and signal flow of the beam controller

解决了小型相控阵天线转台系统空间局限性问题，波束控制器与控制终端相连，通过多组接口直接与天线中 R 组件连接，简化了阵面众多的连接线，进一步减小了系统体积，并减少了安装的复杂度，增加了设备的可靠性。

2.3 基于模糊PID控制的复合控制算法设计

传统的 PID 控制器参数固定，适用于线性系统，而天线伺服系统是一个复杂的非线性系统，采用传统的 PID 控制算法无法进一步提升控制性能。本设计提出一种时间最优控制和参数自适应模糊 PID 控制相结合的复合控制算法，当天线偏离目标误差较大时，系统采用时间最优控制策略，控制器输出最大控制量到伺服驱动器，控制天线以最大速度运行进而快速缩小与目标的角度偏差。天线偏离目标角度误差较小时，本系统设计模糊 PID 控制算法，PID 控制器的参数能够自适应调整，使系统更加平稳、精确地调节到稳定状态。

时间最优控制的算法为

$$u_i = \begin{cases} u_{\max} & |e(i)| \geq \varepsilon \\ 0 & |e(i)| < \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_i 为时间最优控制当前的输出量， u_{\max} 为输出量最大值， $|e(i)|$ 为角度误差绝对值， ε 为设定的时间最优控制边界值。

目前，多数的二维参数自适应模糊 PID 控制器的输入量为系统误差和误差变化率，判断条件和模糊规则数量多，不利于工程应用。本文设计采用系统误差和误差变化率的绝对值作为输入量，简化算法，控制器更加简单，有助于工程实现。本文设计的复合控制器的组成和结构如图 6 所示。参数自适应 PID 控制算法首先确定控制器 k_p 、 k_i 、 k_d 这三个参数与误差绝对值和误差变化率绝对值的模糊关系，建立模糊规则表，控制器实时监测误差绝对值和误差变化率绝对值，然后对其进行

模糊化和判决，通过查询模糊规则表对参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行自适应调整。这种依据不同的输入量来在线调整控制器参数的算法可以使系统具有良好的控制性能。

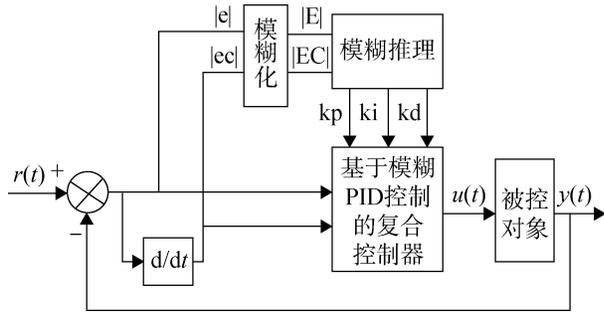


图6 复合控制器组成和结构

Fig.6 Composition and structure of the compound controller

设计模糊控制器输入量为 $|e|$ 、 $|\Delta e|$ ，输出量为PID控制器的参数 k_p 、 k_i 、 k_d 。变量、论域及模糊子集设计见表1。模糊子集均采用 {ZO, AS, AM, AB}，元素依次表示零、绝对值小、绝对值中、绝对值大。控制器输入量和输出量的隶属函数均选择为线性三角形。

表1 变量模糊化规则表

Table 1 Variable fuzzification rule table

变量	语言变量	模糊论域	基本论域	模糊子集
$ e $	E	{0 1 2 3 4 5 6}	[0 5]	
$ ec $	EC	{0 1 2 3 4 5 6}	[0 8]	
k_p	Kp	{0 1 2 3 4 5 6}	[1 4]	[ZO AS AM AB]
k_i	Ki	{0 1 2 3 4 5 6}	[0.001 0.03]	
k_d	Kd	{0 1 2 3 4 5 6}	[1 5]	

依据PID控制器三个参数各自作用和实际调参经验，建立模糊控制规则表见表2~表4。

由上述模糊规则表，得到模糊控制关系矩阵：

$$R = \bigcup_{i,j} E_i \times EC_j \times U_{ij} \quad (2)$$

式中， E_i 为误差绝对值的模糊子集， EC_j 为误差变化率绝对值的模糊子集， U_{ij} 为输出量的模糊子集。 R 的隶属度函数为

$$\mu_R(e, ec, u) = \bigvee_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \mu_{E_i}(e) \wedge \mu_{EC_j}(ec) \wedge \mu_{U_{ij}}(u) \quad (3)$$

式中， $\mu_{E_i}(e)$ 、 $\mu_{EC_j}(ec)$ 、 $\mu_{U_{ij}}(u)$ 分别为误差绝对值，误差变化率绝对值和输出量的隶属度函数， n 、 m

表2 K_p 的模糊规则表

Table 2 K_p fuzzy rules

K_p	E			
	ZO	AS	AM	AB
ZO	ZO	AB	AM	AB
AS	AB	AB	AM	AB
AM	AB	AB	AM	AB
AB	AM	AB	AS	AM

表3 K_i 的模糊规则表

Table 3 K_i fuzzy rules

K_i	E			
	ZO	AS	AM	AB
ZO	AB	AB	AM	AM
AS	AB	AB	AM	AM
AM	AB	AB	AS	AS
AB	AB	AM	AS	ZO

表4 K_d 的模糊规则表

Table 4 K_d fuzzy rules

K_d	E			
	ZO	AS	AM	AB
ZO	AB	AB	ZO	ZO
AS	AB	AB	AS	ZO
AM	AB	AB	AS	AS
AB	AB	AM	AS	AM

为量化级数。

模糊推理选用取大-取小整合^[8]，输出 U 的隶属度函数为

$$\mu_U(u) = \bigvee \mu_R(e, ec, u) \wedge \mu_{E_i}(e) \wedge \mu_{EC_j}(ec) \quad (4)$$

由公式(4)可得到输出量 U 的模糊值，此值使用重心法去模糊化^[9]，在离散域有 n 个量化级数的输出为

$$u_o = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_U(u_i) \times u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_U(u_i)} \quad (5)$$

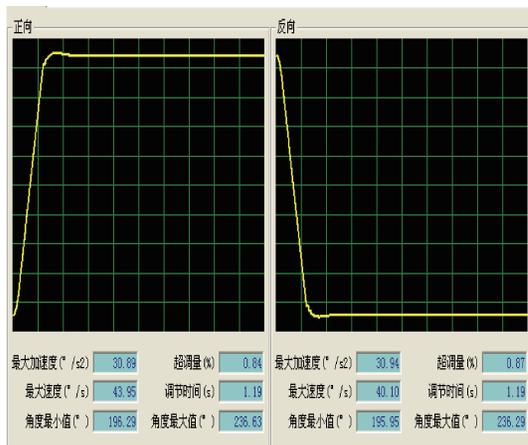
式中， u_o 为模糊控制器输出值， u_i 为输出模糊集合中的离散元素。

由公式(5)可得到模糊PID算法输出量 k_p 、 k_i 、 k_d 的值，进而得到这三个参数的基于模糊论域上的查询表。在模糊PID控制器实际运行时，自适应得到的参数需要乘以比例因子，作为控制器实

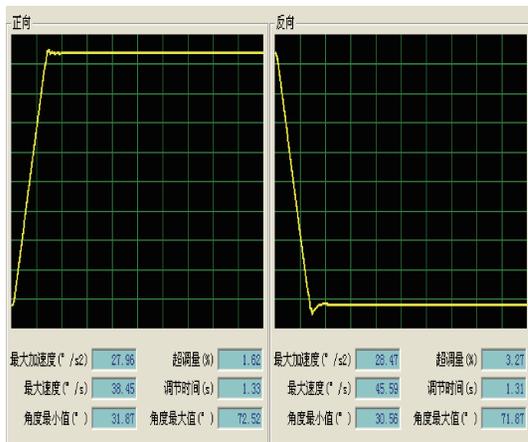
际的参数。

3 实验验证

衡量一个天线伺服控制系统控制性能有两个主要的标准，即系统的动态性能和跟踪精度。在工程应用中，阶跃信号测试的调节时间和超调量一般作为常用的动态性能指标^[10]。跟踪误差是伺服控制系统在驱动天线跟踪运动目标时产生的误差，是系统跟踪精度的度量，正弦信号速度和加速度时刻变化，能够有效地检测天线伺服控制系统的跟踪精度。本次实验中，用阶跃信号和正弦信号测试伺服控制系统对转台机械轴的控制性能，监控计算机发送的阶跃信号幅值为40°，测试时间为10 s，正弦信号的幅值为90°，周期为18.85 s，测试曲线如图7、图8中曲线所示，测试结果见表5。



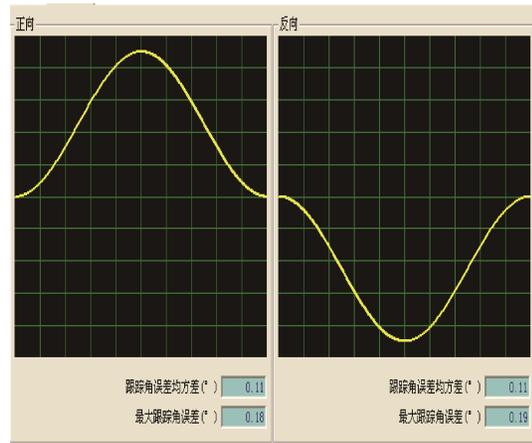
(a) 复合控制的阶跃测试
(a) Step test curve of compound control



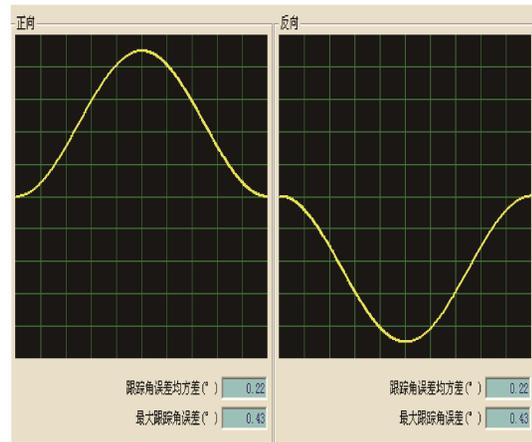
(b) 传统PID控制的阶跃测试
(b) Step test curve of conventional control

图7 阶跃信号测试曲线

Fig.7 Step test curves



(a) 复合控制的正弦测试
(a) Sinusoidal test curve of compound control



(b) 传统PID控制的正弦测试
(b) Sinusoidal test curve of conventional control

图8 正弦信号测试曲线

Fig.8 Sinusoidal test curves

表5 阶跃信号和正弦信号测试数据

Table 5 Data of step test and sinusoidal test

测试项目		复合控制		传统PID控制	
		正方向	反方向	正方向	反方向
阶跃信号测试	调节时间(s)	1.19	1.19	1.62	3.27
	超调量(%)	0.84	0.87	1.33	1.31
正弦信号测试	角度误差均方差(°)	0.11	0.11	0.22	0.22
	最大角度误差(°)	0.18	0.19	0.43	0.43

从阶跃测试曲线和测试结果来看，采用复合控制算法的系统超调量和调节时间均小于采用传统PID控制算法的系统，表明该复合控制算法使伺服控制系统拥有较好的动态性能；从正弦测试曲线和测试结果来看，采用复合控制算法的系统的最大角度误差和角度误差均方差均小于采用传统

PID控制算法的系统,表明该复合控制算法使伺服控制系统拥有更强的追踪动态目标的能力,且具有更高的跟踪精度。

通过跟踪靶标完成相控阵天线转台的自跟踪

精度测试,分别使用机械轴跟踪和相控阵天线电波束跟踪的方式,其中机械轴跟踪又分别采用传统PID控制算法和复合控制算法,得到跟踪目标的角误差结果,如图9所示。

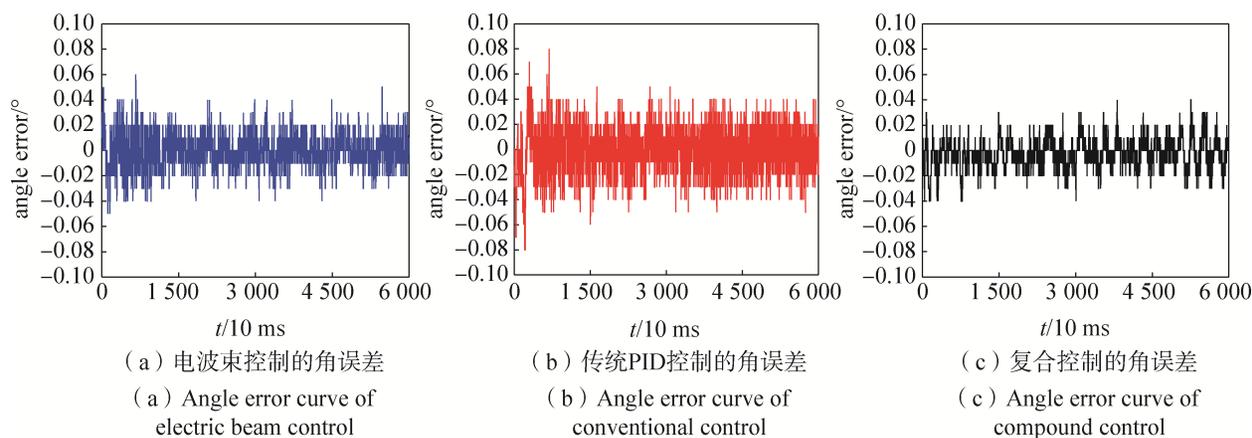


图9 自跟踪精度测试曲线

Fig.9 Auto-tracking precision testing curves

跟踪结果经过数据统计,相控阵天线电波束跟踪靶标的角度误差均方差为 0.016° ,采用复合控制算法的系统机械轴跟踪靶标的角度误差均方差为 0.013° ,采用传统PID控制算法的系统机械轴跟踪靶标的角度误差均方差为 0.021° ,测试结果表明:该系统波束控制器可以有效地控制天线波束跟踪目标,跟踪精度略低于采用复合控制算法的系统机械轴跟踪方式,均优于采用传统PID控制算法的系统。

4 结束语

针对相控阵天线测控系统小型化的需求,设计一种相控阵天线转台伺服控制系统。从体积规模上,优化传统的伺服控制系统设计,伺服控制器和驱动器经过机电一体化设计集成到转台内,便携性好。机动性强。从功能上看,本设计在传统伺服控制系统控制转台机械轴转动从而带动天线跟踪目标的功能基础上,增加波束控制功能,实现天线电波束指向和跟踪目标,适用于相控阵天线测控系统,同时也满足传统抛物面天线测控系统的使用要求。伺服控制器采用参数自适应PID控制结合时间最优控制的复合控制算法,使系统具有良好的控制性能。通过网络通信方式可以实现对多套伺服控制系统的远程控制,具备该伺服控制系统的转台可以部署到目标靶标区、岛屿等

环境恶劣危险的地区执行测控任务。

参考文献

- [1] 刘蓉,肖颖峰.一种多机协同无人机测控系统[J].太赫兹科学与电子信息学报,2016,14(5):706-711.
LIU Rong, XIAO Yingfeng. A multi-aircraft cooperative UAV observe and control system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14 (5): 706-711.
- [2] 潘全文,于劲松,李恩辉,等.分布式可重配置航空测控系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2014,22(5):1368-1370.
PAN Quanwen, YU Jinsong, LI Enhui, et al. Design and realization of aviation measurement and control system based on distributing and reconfiguration technology[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(5): 1368-1370.
- [3] 马纪军,贾军,李铁,等.基于多数字处理器的平板天线伺服控制系统设计[J].遥测遥控,2017,37(5):74-78.
MA Jijun, JIA Jun, LI Tie, et al. Design of servo control system for flat panel antenna based on multi-digit processor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 37(5): 74-78.
- [4] 程宇,潘超.通信相控阵天线双频接收多波束设计[J].舰船电子工程,2020,40(11):81-82,153.
CHENG Yu, PAN Chao. Design of dual-frequency multiple receiving beam in communication phased array an-

- tenna[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(11): 81-82, 153.
- [5] 王晓波, 王轶, 李铁, 等. 数字多波束相控阵天线在测控系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2018, 39(1): 35-40.
WANG Xiaobo, WANG Yi, LI Tie, et al. Research on application of digital multi-beam array antenna in aerospace TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(1): 35-40.
- [6] 张涛. 有源相控阵雷达箔条干扰仿真系统建模与软件设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [7] 刘志丹, 张飞, 赵志平, 等. 相控阵雷达天线焊接技术研究[J]. 电子工业专用设备, 2021, 50(1): 61-66.
LIU Zhidan, ZHANG Fei, ZHAO Zhiping, et al. Research on welding technology of antenna for phased array radar[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2021, 50(1): 61-66.
- [8] 中国地质大学. 一种负压洁净箱调节方法、装置及负压洁净箱:202210854563.1[P]. 2022-10-11.
- [9] 周俊鹏, 李焱. 模糊自整定PID控制器在光电伺服设备中的应用[J]. 电气传动, 2015, 45(9): 62-65.
ZHOU Junpeng, LI Yan. Application of fuzzy self-tuning PID controller in the optical electronic servo device[J]. Electric drive, 2015, 45(9): 62-65.
- [10] 吴伟刚. 高精度光纤陀螺数字控制系统的优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [作者简介]
- 孙天华 1985年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为伺服系统设计。
- 马纪军 1986年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为伺服系统设计。
- 贾建辉 1987年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为伺服系统设计。
- 张雪 1987年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为伺服系统设计。
- (本文编辑: 杨秀丽)