

雷达天线稳定平台的模糊 PID 控制设计

石旭伟, 俞竹青

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对合成孔径雷达 (SAR) 清晰成像的特点, 为保证雷达天线波束指向稳定, 设计了某型机载雷达天线稳定平台; 为了消除雷达天线稳定平台控制中存在的非线性及不确定性因素的影响, 提出了一种应用于雷达天线稳定平台控制系统的模糊 PID 控制策略; 稳定平台是依据陀螺仪所采集载机的角速度, 运用反向运动补偿的原理进行工作; 控制策略中, 在传统 PID 控制的基础上引入模糊控制算法, 根据跟踪误差信号动态改变 PID 控制器参数, 改善稳定平台的控制效果, 完成稳定平台控制器的优化设计; 仿真结果表明, 优化后的模糊 PID 控制算法与传统 PID 控制算法比较, 在稳定平台转速控制方面受到的外部干扰影响更小, 响应速度更快; 因此, 基于模糊 PID 控制算法的雷达天线稳定平台具有更高的稳定性能。

关键词: 合成孔径雷达; 雷达天线稳定平台; 模糊 PID

Design of Fuzzy PID Control for Stable Platform of Radar Antenna

Shi Xuwei, Yu Zhuqing

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Considering the characteristic of the imaging of SAR, the stable platform of radar antenna is designed to guarantee the stability of radar antenna beam pointing. In order to eliminate the influence of the nonlinear and uncertain factors in the stable platform of radar antenna, a fuzzy PID control strategy is proposed for the stable platform control system. Stable platform works by using the principle of reverse motion compensation according to the angular velocity of the aircraft collected by gyroscope. To improve the control effect of stable platform, the optimal design of stable platform controller has been designed by introduced fuzzy control algorithm based on conventional PID control and it dynamically changes PID parameters by tracking error signal. Compared with the conventional PID control algorithm, the simulation result shows that the fuzzy PID control algorithm affected by external interference is smaller and response faster in the application of stable platform revolution control. Therefore, the stable platform of radar antenna based on the fuzzy PID control algorithm has more stable performance.

Keywords: SAR; radar stable platform; fuzzy PID

0 引言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种对静止目标进行检测的高分辨率二维成像雷达。由于其不受天气和光照的影响具有全天候、高分辨率及自动识别目标的能力, SAR 成像技术广泛应用于各个领域^[1]。合成孔径雷达生成高分辨率图像的前提条件是雷达天线相对于被观测地面做匀速直线运动。但由于载机机身小, 在飞行过程中易受到外界气流的扰动, 从而导致 SAR 成像不清晰^[2]。雷达天线稳定平台是一种集机构、伺服控制于一体的复杂精密设备, 安装于载机与 SAR 雷达天线之间, 它能够通过进行反向运动补偿来减小或者消除载机受气流扰动所引起的扰动, 实现对雷达天线波束指向的稳定, 达到 SAR 成像清晰的目的^[3]。

雷达天线稳定平台是由一系列光机电等结构组合而成, 其机械结构的安装误差、电子元器件的性质以及工作环境的变化都会给系统造成误差, 特别是齿轮传动的齿隙、机械谐振、非线性摩擦力等因素。传统的 PID 控制具有结构简单, 输出稳定的特点, 但对于非线性系统的控制却很难达到理想的控制效果^[4]。针对上述情况, 本文提出了一种将模糊逻辑控制与传统

PID 控制相融合的策略。以误差及误差变化率作为输入, 利用模糊控制规则实时对 PID 控制器的 3 个参数进行调整, 形成一个稳定、自适应性强的模糊 PID 控制器, 达到稳定平台控制系统所需的快速性、稳定性。

1 雷达天线稳定平台的数学模型

1.1 稳定平台机械结构设计

雷达天线稳定平台是一种机载稳定平台, 设计方案要求结构紧凑, 采用吊框结构, 重量配比平衡, 这有利于减小平台转动惯量, 从而提高系统的响应速度。雷达天线稳定平台为方位横滚两轴工作平台, 其结构原理如图 1 所示, 技术参数要求为: 方位转角范围为 $\pm 150^\circ$, 精度为 $\pm 0.1^\circ$; 横滚转角范围为 $-20^\circ \sim +90^\circ$, 精度为 $\pm 0.1^\circ$; 最大抖抖速度 $100^\circ/\text{s}$; 跟随速度 $5^\circ/\text{s}$; 工作温度范围为 $-45^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$, 平台零位轮廓尺寸: 长 276.5 mm × 宽 201 mm × 高 149 mm 。

雷达天线稳定平台是针对无人侦察机所设计的, 考虑到其续航和负载能力有限, 因此稳定平台的结构设计要求小型化并轻量化^[5]。

飞行方向为 X 轴正方向, Z 轴为方位轴、X 轴为横滚轴, 两轴都由电机带动减速器传递动力。利用 SolidWorks 软件建立雷达天线稳定平台的三维模型如图 2 所示, 其主要由平台连接件、X 轴伺服电机、天线连接板、Z 轴伺服电机、天线支架、吊框几个部分组成。

1.2 稳定平台动力系统数学模型

为阐述方便, 先以方位向的动力传递关系为例建立机械旋

收稿日期: 2015-10-30; 修回日期: 2015-11-25。

作者简介: 石旭伟 (1992-), 男, 江苏丹阳人, 硕士研究生, 主要从事机载雷达天线稳定平台的研究与开发。

俞竹青 (1962-), 男, 江苏常州人, 博士, 教授, 主要从事机电一体化与机器人技术的研究。

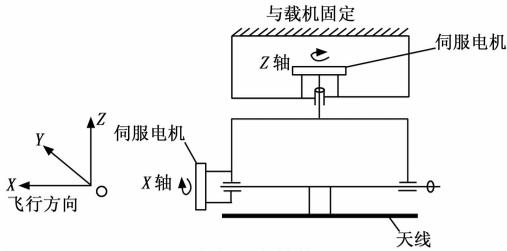


图 1 稳定平台结构原理图

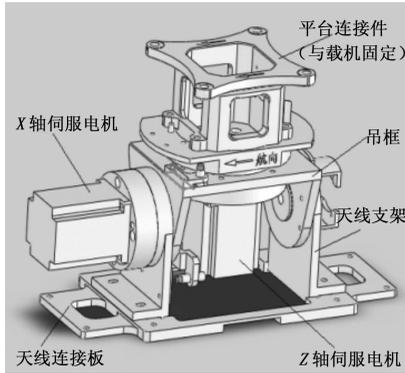


图 2 稳定平台的三维建模

转系统数学模型。

设系统的输入量为 $\theta_i(t)$ (飞机方位向转动的角度), 系统的目标输出量为 $\theta_o(t)$ (稳定平台转过角度), 方位向总负载旋转体的驱动扭矩为 $T_k(t)$, 则:

$$T_k(t) = K[\theta_i(t) - \theta_o(t)] \quad (1)$$

旋转体受阻尼扭矩 $T_B(t)$ 作用, 旋转阻尼特性方程为:

$$T_B(t) = B \frac{d}{dt} \theta_o(t) \quad (2)$$

因此扭矩平衡方程为:

$$J \frac{d^2}{dt^2} \theta_o(t) = T_k(t) - T_B(t) \quad (3)$$

由式 (1) ~ (3) 整理的稳定平台旋转系统运动微分方程为:

$$J \frac{d^2}{dt^2} \theta_o(t) + B \frac{d}{dt} \theta_o(t) + K\theta_o(t) = K\theta_i(t) \quad (4)$$

其中: K 为扭转刚度, J 为转动惯量, B 为阻尼系数。将 (4) 式经过拉氏变换, 得到其传递函数为:

$$G(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K}{Js^2 + Bs + K} \quad (5)$$

减速器两齿轮啮合相当于一个比例环节, 设比例系数为 K_t 传递函数为:

$$G(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{KK_t}{Js^2 + Bs + K} \quad (6)$$

由此得出稳定平台系统控制框图, 如图 3 所示。

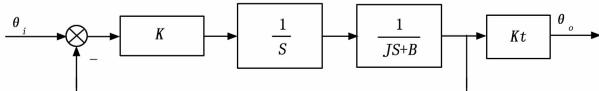


图 3 稳定平台系统控制框图

2 模糊 PID 控制系统设计

2.1 PID 控制系统

PID 控制器是最早发展起来的在工业界实际应用最广泛的

一种线性控制策略之一^[6], 包括比例环节、积分环节和微分环节。比例环节能够成比例地反映控制系统的偏差信号, 积分环节主要用于消除静差而微分环节则能够反映偏差信号的变化趋势, 引入修正信号, 加快系统的动作速度, 减小调整时间。PID 的控制规律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

式中, $u(t)$ 为控制输出信号; $e(t)$ 为控制输入信号 (偏差信号); K_p, K_i, K_d 为控制器的比例系数、积分时间常数、微分时间常数。

PID 控制的特点是对控制参数进行设置, 即比例系数 K_p , 积分系数 K_i , 微分系数 K_d 3 个参数进行调整^[7]。因为雷达天线稳定平台系统具有非线性, 且整个系统受到一些不确定因素的干扰, 即使合理调节整定 PID 的 3 个参数也难以达到理想的控制效果, 因此必须考虑到对 K_p, K_i, K_d 3 个参数进行自适应在线调整, 采用模糊逻辑控制与传统 PID 相结合的控制技术, 才能达到机载雷达天线稳定平台系统的鲁棒性强、高精度的控制要求。

2.2 模糊 PID 控制系统

2.2.1 模糊 PID 控制方法

模糊控制是由控制专家 Lotf A. Zadeh 教授于 1965 年提出, 是一种以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控制^[8]。模糊 PID 控制器利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修整, 构成自适应 PID 控制器, 该控制器已被广泛应用于工业生产中。

其模糊逻辑整定 PID 控制器的表达式为:

$$K_p(k) = K_p(k-1) + \gamma_p(k) \Delta K_p \quad (8)$$

$$K_i(k) = K_i(k-1) + \gamma_i(k) \Delta K_i \quad (9)$$

$$K_d(k) = K_d(k-1) + \gamma_d(k) \Delta K_d \quad (10)$$

其中: $\gamma_p(k), \gamma_i(k), \gamma_d(k)$ 为校正速度量, 其值随校正次数增加而减小, 为了系统的简便, 也可以将其设置为常数。由式 (8) ~ (10) 可计算控制量:

$$u(k) = K_p(k)e(k) + K_i(k) \sum_{i=0}^k e(i) + K_d(k)[e(k) - e(k-1)] \quad (11)$$

由于式 (11) 中 $\sum_{i=0}^k e(i)$ 的计算困难, 因此引入变量 $x(k) = \sum_{i=0}^k e(i)$, 导入状态方程为:

$$x(k+1) = x(k) + e(k) \quad (12)$$

此时, 式 (11) 可以改写成:

$$u(k) = K_p(k)e(k) + K_i(k) \sum_{i=0}^k e(i) + K_d(k)[e(k) - e(k-1)] \quad (13)$$

根据其算法, 编写 S-函数作为模糊 PID 控制器的核心部分。模糊 PID 控制器的结构如图 4 所示, 以误差 e 和误差变化 ec 作为输入, 利用模糊推理规则在线对 PID 参数进行修改, 构成自适应模糊 PID 控制器。

2.2.2 模糊 PID 控制规则

K_p, K_i, K_d 3 个参数的大小直接影响系统的稳定性、响应速度及稳态精度^[9]。比例系数 K_p 能够加快系统的响应速度; 积分时间常数 K_i 能够消除系统的稳态误差; 微分时间常数 K_d 改善系统的动态性能, 对偏差变化进行提前预报^[10]。根据

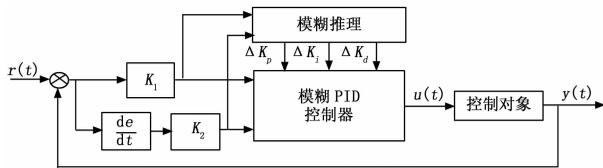


图 4 模糊 PID 控制器控制框图

K_p, K_i, K_d 3 个参数的作用, 结合实际操作经验建立合适的模糊规则表 (表 1~表 3)。

1) 偏差较小时, 增大 K_p, K_i , 保证系统的稳定性, 适当选取 K_d 来提高系统的抗干扰能力。

2) 偏差适中时, 取较小的 K_p 来减小超调量并保证较快的响应速度。

3) 偏差较大时, 取较大的 K_p 及较小的 K_d 来提高响应速度, 可以使积分时间常数为零来防止超调量过大。

表 1 K_p 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	ZO	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	NS	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB	NB

表 2 K_i 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NM	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NM	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO						
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3 系统分析与仿真

雷达天线稳定平台安装在载机与天线之间, 当载机发生方位转动时, 陀螺仪就会产生相应的角速度信号, 将该信号转化为电压信号输入到 DSP 系统的控制端, 并把该信号作为当前信号。电机自带的编码器以一定频率向 DSP 输出信号, 该信

号作为当前信号并与当前信号进行对比, 由算法推出一定占空比的 PWM 脉冲信号来控制直流无刷伺服电机的转速。电机自带的霍尔传感器感知电机转子在电机中的当前位置, 控制六路场效应管的导通与闭合, 从而控制电机的转动方向。因此, 当载机发生偏移时, 直流无刷伺服电机就会产生相应的反向力矩, 使平台相对载机偏移方向上产生等大小的反向转动, 实现天线波束的指向稳定。图 5 所示为某型雷达天线稳定平台系统的控制框图。电流环对电机进行保护, 当电机过载或者堵转时, 限制电机电流超过电流最大值, 保护电机及控制器的安全; 速度环提高系统动态性能指标, 减小非线性因素的影响; 位置环使系统实现快速、稳定、精确的角位置控制。

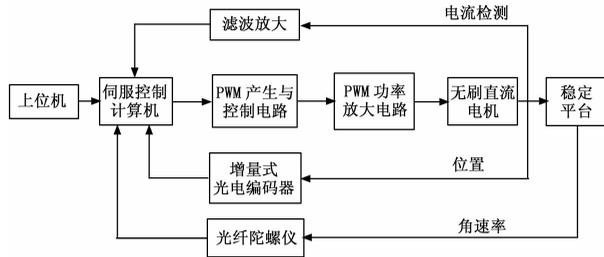


图 5 稳定平台系统控制框图

在系统中, 直流无刷伺服电机的具体参数如下, 额定电压: 24 V; 额定功率: 78 W; 额定转速: 3 000 rpm; 额定转矩 0.25 N·m; 转子转动惯量: $2.2 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 电机电阻: $0.6 \Omega (\pm 10\%)$; 电机电感: $0.8 \text{ mH} (\pm 20\%)$; 增量式光电编码器光栅数: 1 000 线。天线稳定平台方位向负载等效转动惯量: $1.3 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。电机传递函数为:

$$G(s) = \frac{1/C_e}{1 + T_m s + T_e T_a s^2}$$

其中: T_m 为机电时间常数; T_e 为电磁时间常数; C_e 为电势常数。

由于 $T_m \gg T_e$, 简化成 $G(s) = \frac{1/C_e}{1 + T_m s}$, 故电机的传递

$$\text{函数为: } G(s) = \frac{1.2}{1 + 0.00133 s}$$

采用 MATLAB 对系统的速度响应进行仿真。图 6 为模糊 PID 控制器的仿真模型, 图 7 为模糊 PID 控制器的内部结构。模糊 PID 的采样周期为 0.001 s, 初始值 $K_p = 0.3, K_i = 0, K_d = 0.9$ 。图 8 为无干扰状态下阶跃响应曲线, 模糊 PID 的响应更快, 调整时间为 0.1 s, 传统 PID 的调整时间为 0.13 s, 超调量也大于模糊 PID 控制的阶跃响应曲线。图 9 为模糊 PID 控制器在线调整 PID 三个参数的变化曲线。图 10 为有干扰的阶跃响应曲线, 在 0.4 s 时加入干扰信号, 从仿真曲线可知,

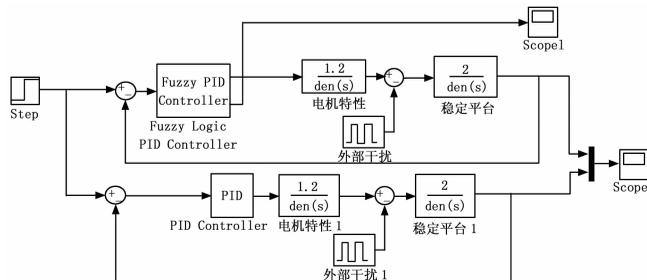


图 6 稳定平台系统模糊 PID 控制器仿真模型

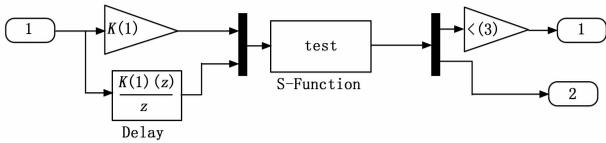


图 7 模糊 PID 控制器结构

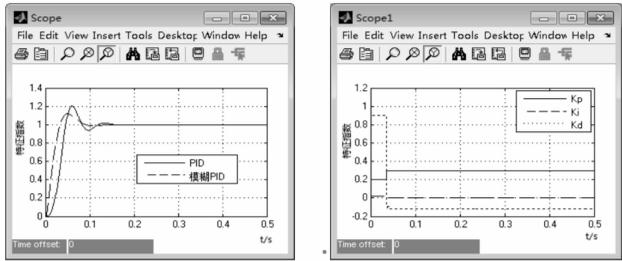


图 8 无干扰状态下阶跃响应曲线 图 9 模糊 PID 参数变化

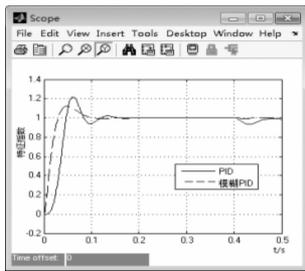


图 10 干扰状态下阶跃响应曲线

模糊 PID 控制器曲线抖动小于传统 PID 的曲线。由仿真结果表明模糊 PID 控制器在超调量和调整时间的控制相比于传统 PID 的控制器有很好的效果，对外部干扰能够很快恢复到稳定状态。因此，将模糊逻辑控制与传统 PID 控制相结合的控制具有响应速度快，超调量小，并且使系统更加稳定。横滚向动力传递系统的分析与仿真与方位同理，仿真结果亦相同。

(上接第 50 页)

1) 故障类型识别技术：通过神经网络和模糊算法的研究，可以将已有数据和已知故障模式作为样本，通过学习得出数据量与故障模式间的映射关系，实现对人类经验思维的模拟。得出故障类型精确定位为：元器件失效、输入条件变化、外界环境变化等类型。

2) 故障影响域分析技术：根据故障类别，系统给出影响区域。对影响区域的故障进行分析，给出此故障是否影响火箭安全飞行的建议。

3) 故障干预方法形成和智能解决技术：在系统给出影响飞行安全的报警时，故障干预可以主动中止主机的测试流程，进行故障模式的测试。故障模式测试包括对故障点的检测、故障的复现测试和故障单元隔离测试等。在故障源定位后，由故障诊断计算机给出故障类型的 ID，传输到专家系统知识库，自动给出解决方案，并形成解决方案报告。

测试数据快速分析及智能专家故障诊断技术的应用，可实现对全箭测试数据综合应用、故障信息的实时监测、诊断以及快速指挥决策，为运载火箭的快速测发奠定技术基础，提高了测试与发射的维护效率。

4 结论

设计了雷达天线稳定平台的机械结构及其系统控制器，由于稳定平台是一个多部件的复杂机械结构，存在着非线性、强耦合、负载扰动等特点，提出了一种模糊逻辑控制与传统 PID 控制相结合的一种智能控制策略，根据陀螺仪所采集载机的数据，实时控制直流无刷伺服电机，实现雷达天线波束指向稳定，最终达到清晰成像的目的。MATLAB 仿真结果表明，基于模糊 PID 的雷达天线稳定平台控制器响应速度快，具有较强的鲁棒性。

参考文献：

- [1] 王 强, 黄建冲, 姜秋喜. 合成孔径雷达的主要发展方向 [J]. 现代防御技术, 2007, 35 (2): 81-83.
- [2] 陆 岷, 张 平. 基于 DSP 的天线稳定平台控制器 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (8): 1052-1054, 1071.
- [3] 严 诺. 某机载雷达二维稳定平台结构设计 [J]. 电子机械工程, 2005, 21 (3): 38-39, 55.
- [4] 陆华才, 徐月同, 杨伟民, 等. 永磁直线同步电机进给系统模糊 PID 控制 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (4): 59-63.
- [5] 王晶东, 于化东, 李 妍. 小型无人机载光电稳定平台框架结构研究 [J]. 机械科学与技术, 2014, 33 (10): 1604-1608.
- [6] 薛定宇, 张晓华. 控制系统计算机辅助设计——MATLAB 语言与应用 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] 杨 璐, 雷菊阳. 基于 MATLAB 的参数自整定模糊 PID 控制器的两种设计方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1212-1214.
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [9] 刘晓峰, 刘昕晖, 王龙山, 等. 基于模糊 PID 控制的大型履带起重双马达速度同步控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2011, 41 (3): 659-664.
- [10] 杜荣华, 等. 无刷直流电机自适应模糊 PID 控制及仿真 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2014, 11 (2): 60-66.

3 结论

随着测量与控制技术提高、新型控制模块应用及系统集成水平提高，运载火箭全箭系统集成度在不断提高，使运载火箭集成智能化测试系统先进技术能够得到推广应用。通过进一步优化测发控系统结构、移动、高速数字总线和 BIT 一体化综合测试、智能实时判读等技术，可构建出性能更好的集成智能化测试系统。未来测试系统会朝着更加优化的测试模式、更高集成度和可靠性、可移动性以及测试数据更智能、实时判读的方向发展，对于测试故障会更加智能化、更加准确地定位，实现集成智能化测试技术的先进理念，满足未来航天装备快速进入空间需要。

参考文献：

- [1] 杜诚谦, 等. 新一代运载火箭地面测发控一体化设计概述 [J]. 航天控制, 2004 (01): 50-52.
- [2] 韩九强, 等. 现代测控技术与系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [3] 孙传友, 等. 测控系统原理与设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [4] 杨 华. 运载火箭新型地面测发控系统构想 [J]. 宇航学报, 2010 (3): 26-27.
- [5] 李行善. 自动测试系统集成技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.