

# 基于双模控制的直流力矩发动机控制系统设计

折 越

(西安邮电大学 自动化学院, 西安 710121)

**摘要:** 针对航空发电机对控制直流力矩发动机性能要求, 在分析传统控制系统故障目标精确定位速度慢基础上, 提出了基于双模控制的直流力矩发动机控制系统设计; 根据直流力矩发动机双模控制原理, 设计系统总体结构; 通过转速信号模拟器产生数字信号, 在串行 A/D 转换电路中引入 MAX144 型号可编程逻辑器件, 改善信号转换精准度; 使用碳化硅 (SiC) 智能功率模块, 为硬件设备提供合适膨胀匹配系数, 改善能耗问题; 选择 TMS320F28335PGFA 型号数字信号处理器, 可将信号转换为数字形式; 控制电源开关频率在 50~100 kHz 范围内, 具有一定抗干扰能力; 添加电流环, 为发动机提供相对恒定电流; 在 MPLAB IDE 集成开发环境下, 采用双模控制磁场补偿方式调试电流环控制程序, 选择大小适中的通电电流, 设置转子预定位程序, 根据系统主程序流程, 完成发动机控制系统设计; 由试验结果可知, 该系统在故障目标精确定位速度上最快可达到 0.05 个/s, 大大增强了系统鲁棒性能。

**关键词:** 双模控制; 直流力矩; 发动机; 控制系统

## Design of DC Torque Engine Control System Based on Dual-mode Control

She Yue

(School of Automation, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** Aiming at the performance requirements of aero-control generators of controlling DC torque engines, based on the analysis of the slow positioning accuracy of traditional control system fault targets, a DC torque engine control system design based on dual-mode control is proposed. Based on the dual-mode control principle of DC torque engine, the overall structure of the system is designed. The digital signal is generated by the speed signal simulator, and the MAX144-type programmable logic device is introduced into the serial A/D conversion circuit to improve the signal conversion accuracy. Use silicon carbide (SiC) intelligent power modules to provide suitable expansion matching coefficients for hardware equipment and improve energy consumption. Select TMS320F28335PGFA digital signal processor to convert the signal into digital form. The switching frequency of the control power is in the range of 50~100 kHz, which has certain anti-interference ability. Adding a current loop provides a relatively constant current to the engine. In the MPLAB IDE integrated development environment, the dual-mode control magnetic field compensation method is used to debug the current loop control program, select a moderate current, set the rotor pre-position program, and complete the engine control system design according to the system main program flow. It can be known from the test results that the system can reach the fastest positioning accuracy of 0.05 targets per second, which greatly enhances the robust performance of the system.

**Keywords:** dual mode control; DC torque; engine; control system

## 0 引言

电力行业是现代行业的主导产业, 也是电气工程的核心, 能够更好带动国民经济快速增长。发电机是实现电能转换的重要装置, 在航天航空领域得到广泛应用。无论是燃气发动机还是柴油发动机作为应用在航空设备上的动力装置, 都会出现冲击性负载问题<sup>[1]</sup>。由于柴油发动机力矩属性较软, 在使用过程中, 一旦遇到渣滓, 容易出现转动不动现象, 运转过程中冲击性负载对于动力装置提出了更高要求, 尤其是航空发电机大角度失调时需要快速定位, 并重新控制目标。传统控制方式采用的是 Bang-Bang 控制系统, 在系统出现故障时, 可以加大对系统控制力度<sup>[2]</sup>。传统 Bang-Bang 控制系统利用相平面分析法, 虽然提高了系

统控制力度, 但时间过长; 而采用非线性控制系统, 提出了一种偏差控制方式, 具有较大局限性, 无法对故障目标精确定位; 采用廉价编码盘设计直流力矩发动机控制系统, 虽然能够实现高精度定位效果, 但不适用于航空发动机跟踪设备。

针对上述存在的问题, 提出了基于双模控制的直流力矩发动机控制系统设计。根据双模控制原理, 系统自动追踪故障目标, 该过程接近最佳过渡的故障目标追踪动态过程, 避免其受到外界扰动影响, 以实现航空发电机恒功率运行和转速高精度控制。

## 1 基于双模控制系统整体结构设计

直流力矩发动机双模控制原理如图 1 所示。

依据发动机及跟踪架传递函数, 计算系统动态误差, 在小偏差范围内切换为线性控制方式<sup>[3]</sup>。通过上述分析, 采用双模控制方法切入到线性控制时的可行转换原则:

首先对航空发电机失调角度限速, 保证限速后的失调角

收稿日期: 2019-12-10; 修回日期: 2020-01-16。

作者简介: 折越 (1991-), 男, 陕西延川人, 硕士, 助理工程师, 主要从事电子电力、自动控制方向的研究。

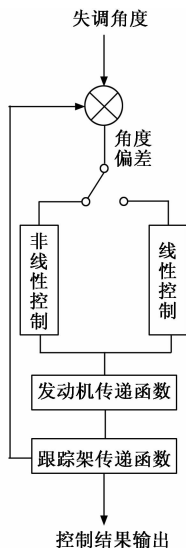


图 1 直流力矩发动机双模控制原理

度在转化为线性控制后，不会冲出双模控制范围。确定回路校正输出饱和值，获取双模控制切入到线性控制时的位置偏差，依据系统设计原理，捕获切入到故障跟踪阶段的转换准则<sup>[4]</sup>。依据该准则，设计直流力矩发动机控制系统。

基于双模控制的直流力矩发动机控制系统是由硬件和软件共同组成的，硬件是系统控制的基础，而软件部分是系统控制的关键部分，只有两者相互配合，系统才能可靠运行<sup>[5]</sup>。

系统总体结构如图 2 所示。

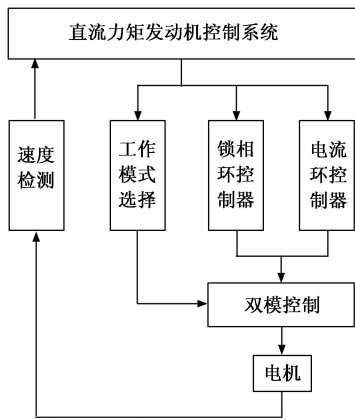


图 2 系统总体结构

当系统运行速度值与实时反馈值之差大于设定的基准偏差值时，电动机在电流环控制器下，按照恒定功率加速方式，使系统在恒定加速模式下运行。反之，当系统运行速度值与实时反馈值之差小于设定的基准偏差值时，将发动机切换到锁相环工作模式，实现故障的精准定位<sup>[6]</sup>。通过相应控制电路，增强系统抗干扰性能。

## 2 控制系统硬件设计

系统硬件结构如图 3 所示。

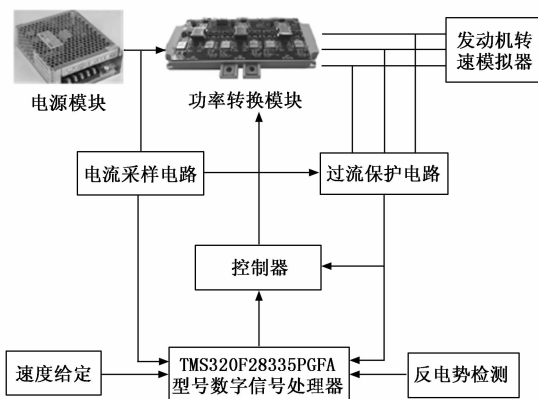


图 3 系统硬件框图

系统主控芯片采用 TMS320F28335PGFA 型号数字信号处理器，系统整体结构是由电源模块、功率转换模块、驱动模块以及电路组成的。直流力矩发动机经过三段式启动后，检测电路对电压采样情况，系统将采集到的信号传输到数字信号处理器之中，分析转子转动情况。脉冲宽度调制信号经过驱动模块控制，完成换相<sup>[7]</sup>。

### 2.1 转速模拟器

转速信号模拟器作为控制系统中应用最为普遍测量仪器之一，在不启动发动机情况下，模拟产生并输出供航空发电机所需的转速信号。给定电流信号调试电子调速器，能够大幅度节省燃油费用，并且提高系统故障检测精准度；在开机状态下，能够现场检测发动机转速信号，并通过人机界面显示数值<sup>[8]</sup>。

该模拟器主要是由航空发电机电源、信号产生器、信号调理器、单片机测量显示器等模块组成的，通过频率调整旋钮，使输出频率变为可调标准方波信号，并通过数码管显示出来。由于航空发电机为调试对象，因此，转速测量是该模拟器中的特殊功能<sup>[9]</sup>。

转速信号模拟器中的串行 A/D 转换电路如图 4 所示。

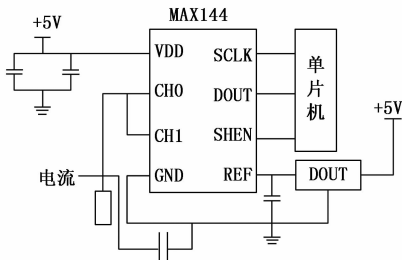


图 4 串行 A/D 转换电路

由转速信号模拟器将产生的 0~20 mA 电流转换为 0~2.0 V 模拟电压信号，连接到 MAX144 型号可编程逻辑器件上，并依次将其连接到 CHO 和 CH1 端口。将可编程逻辑器件参考基准电压设置为 2 V，如此能有效提高信号转换精准度。

### 2.2 功率转换模块

碳化硅 (Sic) 智能功率模块具有质量轻、体积小的优

势, 该模块有助于提高功率转换器密度。该模块是栅极驱动器与功率晶体管完全结合的产物, 利用碳化硅低切换损耗和高工作温度优势, 使功率模块在极端条件下实现可靠运行。对于航天发电机级模块, 具备三相功率转换器拓扑结构, 每个切换位置中都含有一个 100A 碳化硅晶体管和 100A 肖特基续流二极管。碳化硅材料在允许结温条件下可靠运行, 以此降低冷却标准。以提供与硬件设备之间最合适的膨胀匹配系数, 最大限度减少电感可更快切换碳化硅晶体管, 并降低转换能耗。

### 2.3 数字信号处理器

选择 TMS320F28335PGFA 型号数字信号处理器, 是一种专用于数字信号处理的微处理器, 该处理器可将信号转换为数字形式。内置数字信号处理器是系统主机内通过逻辑电路对数字信号进行加工的, 也是数字信号处理器专用芯片。TMS320F28335PGFA 型号数字信号处理器并非只局限于音视频层面, 采用通用微处理器完成大量数字信号处理, 满足实际要求。使用片式微处理器具有复杂逻辑程序, 通过这些程序能够快速实现对信号采集、变换、估值、增强、压缩与识别等处理, 获取符合系统要求的信号形式。

### 2.4 电源模块

电源模块是电路板上的电源供应器, 该类模块为负载点电源, 具有隔离作用, 抗干扰能力较强, 自带保护功能, 方便集成。高频小型化开关电源成为发动机系统主流, 在通信领域中, 将单相和三相交流电网变换为直流电源形式。在转速模拟器使用的一次电源中, 高频开关电源通过 IGBT 高频工作, 开关频率控制在 50~100 kHz 范围内, 实现开关电源的高效率供电。

### 2.5 电流环控制器

对于高速航天发电机, 设计的发动机电流环控制器随着转子转速升高, 发动机驱动电流逐渐下降, 进而不断调高控制电压。为了改善系统控制效率, 添加电流环, 为发动机提供相对恒定电流。

电流环控制器对转子位置信号进行逻辑处理后, 产生脉宽调制信号, 经过串行 A/D 转换电路处理后传送至逆变器之中, 进而控制发动机设备正常运作。在电流环控制器中使用三相全控式电路, 主要是由三个沟道功率管组成的, 每个沟道功率管都带有反向续流二极管。通过改变控制电压, 就可高效调节脉宽占空比, 以此改变绕组平均电压, 控制发动机稳定运转。

## 3 系统软件设计

对于基于双模控制的直流力矩发动机控制系统软件部分设计, 在 MPLAB IDE 集成开发环境下完成的程序设计, 通过 PIC 仿真下载器调试程序, 并将其下载到 TMS320F28335PGFA 型号数字信号处理器之中。

### 3.1 电流环控制程序

采用双模控制磁场补偿方式, 检测电源母线电路电流大小, 并监控发动机工作电流。由于电流环控制器在控制电流为 0 时, 对应 2.5 V 输出电压, 一旦电流增加 1A 电

流, 那么双模控制下的输出电压增加 1/10, 因此, 为了精准获取电流变化情况, 使用如下传递函数:

$$U_0 = (L - 2.5)k_1 + U_1 \quad (1)$$

公式 (1) 中:  $U_1$  表示控制输出电压;  $k_1$  表示正向比例;  $L$  表示输出电流。在电流负反馈作用下, 控制电流环电流输出, 实现直流力矩发动机以恒功率方式正常工作。

### 3.2 转子预定位程序

在转子预定位阶段进行两次定位, 以此提高定位成功率。首先给两相绕组通电, 保证其具有足够大的电流, 如果通电电流过大, 那么将会引起直流力矩变大, 那么较大惯性的转子将会在预定位置来回摆动; 反之, 电流过小, 那么直流力矩也变小, 因此, 需要选择大小适中的通电电流。

航空发电机转子预定位程序流程设计如下所示:

设直流力矩发动机绕组通电状态 state 为 0, 此时脉冲宽度调制占空比为 0, 两相绕组通电, 此时通电状态 state 为 1。增大脉冲宽度调制占空比, 两相绕组通电时间延迟到 100 ms, 此时判断脉冲宽度调制占空比是否大于 50%? 如果不是, 则需重新增大脉冲宽度调制占空比。如果是, 则再次通电两相绕组, 此时通电状态 state 为 2。脉冲宽度调制占空比再次回归到 0, 增大脉冲宽度调制占空比, 两相绕组通电时间延迟到 100 ms, 再次判断脉冲宽度调制占空比是否大于 50%? 如果不是, 则需重新增大脉冲宽度调制占空比。如果是, 则完成转子预定位程序设计。

### 3.3 系统主程序

系统主程序设计如图 5 所示。

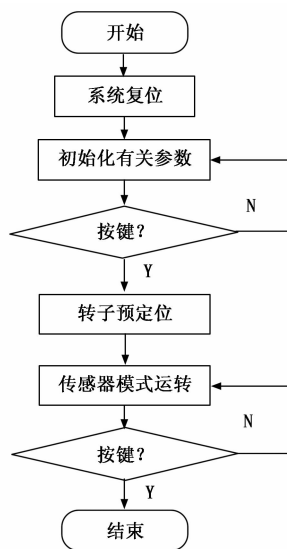


图 5 系统主程序设计

将系统复位, 并初始化与用户有关的参数, 当按下启动键时, 需进行转子预定位。待定位完成后, 切换到同步加速运行状态, 发动机转速逐渐升高, 由此完成系统软件程序设计。

## 4 试验与分析

系统实验对象为直流力矩发动机控制系统, 为了验证

基于双模控制的直流力矩发动机控制系统设计合理性,需将传统的 Bang-Bang 控制系统、非线性控制系统和廉价编码盘控制系统与之对比。

### 4.1 实验平台搭建

在完成直流力矩发动机控制系统软硬件设计后,需搭建实验平台,调试控制系统软硬件,并在该平台上分析发动机相关实验波形,以此验证系统设计的合理性。

通过人机交互界面,在监测画面中可以观察到发动机转速情况,以此确定发动机速度控制范围。在给定速度情况下,查看发动机稳定运行时实际速度以及出现故障情况实时速度。具体实验原理与流程如图 6 所示。

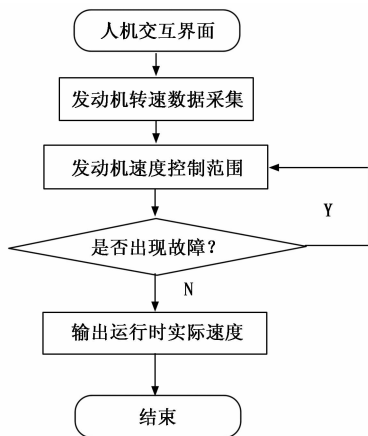


图 6 实验原理与流程

如图 6 所示,为直流力矩发动机控制系统验证平台,使用的实验设备有:

- 1) 选择型号为 DC12 V/24 V 的永磁直流电机,具有齿轮减速马小达正反开关;
- 2) 选择 UTP3315TFL 型号的直流电源,具有 30 V/32 V 稳定电源;
- 3) 采用 MZ73 消磁电阻具有二、三脚电阻器;
- 4) 采用 SDS1122E+ 数字示波器,具有 150~200 M 双通道示波器。

### 4.2 实验参数设置

实验参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数设置

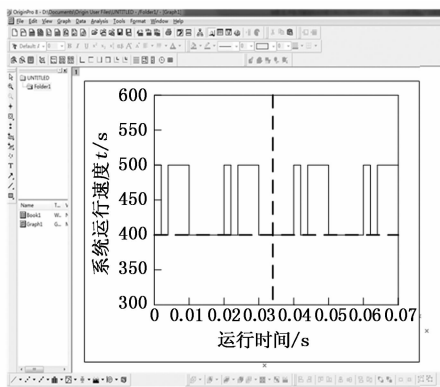
项目	数值
转子组件	12.5kg
额定电压	30V
额定转矩	0.040Nm
转子惯性矩	0.050kg·m <sup>2</sup>
回路电阻	0.25Ω

通过调节控制芯片输出的信号可以实现发动机转速的调节,有效减少电动机转矩脉动。

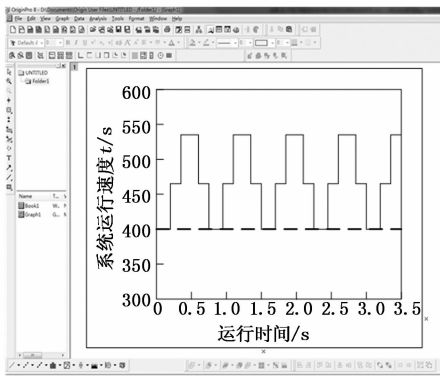
### 4.3 发动机速度波形分析

直流力矩发动机控制系统一旦开启后,系统运行速度

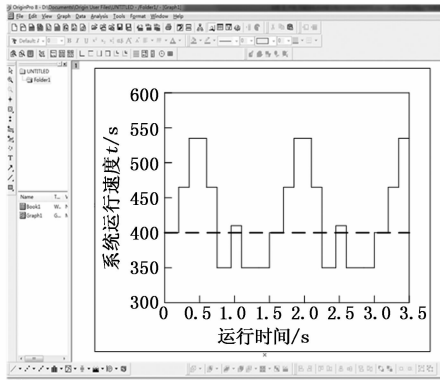
在人机界面下,显示的波形如图 7 (a) 所示,实际系统运行速度波形如图 7 (b) 所示,故障情况下系统运行速度波形如图 7 (c) 所示,其中 T 表示指令。



(a) 刚启动波形



(b) 实际运行波形



(c) 故障情况下系统运行波形

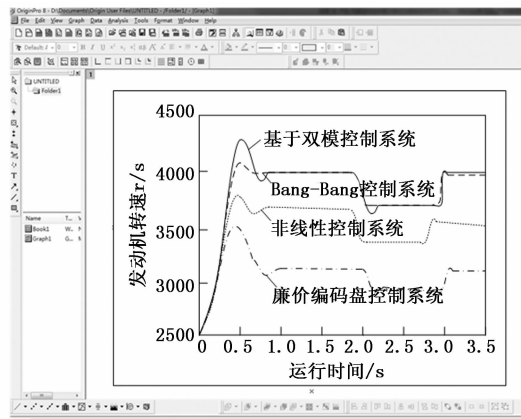
图 7 系统速度波形

由图 7 可知:系统刚启动时的速度波形上下波动幅度一致,具有一定规律性;实际系统运行速度波形随着运行时间变化发生改变,最高运行速度为 540 T/s,最低运行速度为 400 T/s;故障情况下系统运行波形变化极不规律,最高运行速度为 540 T/s,最低运行速度为 350 T/s。为了研究直流力矩发动机控制系统故障检测定位速度,需详细分析故障情况下系统运行情况。

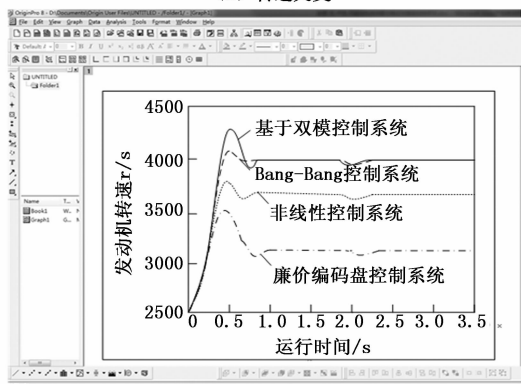
### 4.4 试验结果与分析

由于每次转子预定位过程,发动机转速受到运行时间

影响，导致转速大不相同，为了方便分析，将传统系统与基于双模控制的直流力矩发动机控制系统在实际运行情况与出现故障，即转速突变和突加负载情况下进行对比分析，结果如图 8 所示。



(a) 转速突变



(b) 突加负载

图 8 四种系统转速曲线分析

图 8 (a)：在运行时间为 0.5 s 时，四种系统发动机转速不同，基于双模控制系统转速达到最高为 4300 r/s，传统 Bang-Bang 控制系统转速达到最高为 4100 r/s，非线性控制系统转速达到最高为 3750 r/s，廉价编码盘控制系统转速达到最高为 3500 r/s。当运行时间为 2.2 s 时，四种系统发动机转速都达到最低，依次为 3700 r/s、3650 r/s、3350 r/s、2900 r/s。当运行时间为 1.0~2.0 s/3.0~3.5 s 时，系统处于稳定运行状态。

图 8 (b)：突加负载下，四种系统发动机转速不变，但当运行时间为 2.0 s 时，四种系统发动机转速最小值发生改变，依次为 3900 r/s、3900 r/s、3700 r/s、3100 r/s。当运行时间为 1.0~2.0 s/2.5~3.5 s 时，系统处于稳定运行状态。

基于上述分析内容，将四种系统的故障检测定位速度进行对比分析，结果如表 2 所示。

由表 2 可知：基于双模控制系统故障检测定位速度最快，而 Bang-Bang 控制系统故障检测定位速度最快为 0.10 个/s，相比于基于双模控制系统，速度慢 0.05 个/s；非线性控制系统故障检测定位速度最快为 0.11 个/s，比基于双模控制系统故障检测定位速度慢 0.06 个/s；廉价编码盘控制

表 2 四种系统故障检测定位速度对比分析

故障数量/个	Bang-Bang 控制系统	非线性控制系统	廉价编码盘控制系统	基于双模控制系统
2	0.10 个/s	0.11 个/s	0.20 个/s	0.05 个/s
5	0.20 个/s	0.25 个/s	0.40 个/s	0.10 个/s
10	0.35 个/s	0.39 个/s	0.55 个/s	0.12 个/s
15	0.50 个/s	0.55 个/s	0.70 个/s	0.15 个/s
30	0.70 个/s	0.80 个/s	0.95 个/s	0.20 个/s

系统故障检测定位速度最快为 0.20 个/s，比基于双模控制系统故障检测定位速度慢 0.15 个/s。由此可知，基于双模控制的直流力矩发动机控制系统设计是具有合理性的，且故障检测定位速度较快。

### 5 结果语

在现代控制系统中，基于双模控制的直流力矩发动机控制系统已经成为航空设备主流系统，将计算机资源从复杂数据中解放出来，进而可以更好实施整个系统的高效控制与管理。在精准度定位下，目标满足图像提取要求，结合双模控制原理完成故障目标捕获。通过实验结果表明，在既定的直流力矩发动机基础上，加以双模控制，在故障目标精准度定位速度上最快可达到 0.05 个/s，具有良好控制效果。但该方法设计的直流力矩发动机控制系统，在实际应用中，需要克服较大阻尼力矩，可以利用补偿电机带动直流力矩发动机启动，对于增加较大容量的能量存储设备等方面有待进一步研究。

### 参考文献：

- [1] 孙毅, 李昌, 刘慧, 等. 火箭游动发动机伺服控制中的摩擦阻尼特性研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2018, 4 (3): 69-72.
- [2] 李贵炎, 鲁植雄. 基于功率跟踪式约束的发动机开关控制方法 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (12): 133-138.
- [3] 顾文婷, 陈迎春, 辛振庆, 等. 背撑发动机进排气对翼身融合民机气动特性影响 [J]. 航空动力学报, 2019, 34 (6): 1297-1310.
- [4] 毛柏源, 李君龙, 张锐, 等. 大姿控力矩复合控制导弹制导控制一体化设计 [J]. 现代防御技术, 2019, 8 (3): 56-63.
- [5] 鲍久圣, 纪洋洋, 阴妍, 等. 摩-磁复合制动性能及恒力矩制动控制研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (5): 156-165.
- [6] 雷拥军, 袁利, 王淑一, 等. SGCMG 系统的力矩指令调节及动态分配操纵方法 [J]. 宇航学报, 2019, 9 (7): 794-802.
- [7] 张铁, 张爱民, 覃彬彬, 等. 柔体动力学模型的机器人柔性力矩前馈控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40 (8): 1509-1516.
- [8] 林鲁超, 徐开, 陈长青, 等. 单框架控制力矩陀螺转子的稳速控制 [J]. 电光与控制, 2019, 26 (8): 95-100.
- [9] 曹永奎, 廖育荣, 倪淑燕, 等. 基于剪式控制力矩陀螺的低轨卫星垂轨摆扫姿态控制 [J]. 航天控制, 2019, 8 (4): 47-53.