

空间核动力平台电力管理系统的设计

刘世超, 李 阳, 吴春瑜, 靳 洋, 高劭伦

(上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘 要: 空间核动力平台是一种全新的电源推进一体化航天器, 其电力系统具有三相交流输出、工况多且复杂、母线电压体制多等特点。为了解决空间核动力平台负载供电诸多难题, 通过对系统功能、负载类型、母线体制、组成配置、工作模式、控制机制等方面论证分析, 提出了一种新型空间核动力平台电力管理系统架构。其中, 变配电系统从硬件实现角度解决了基于布雷顿热电转换系统输出为负载稳态供电问题, 自主控制系统从软件控制角度解决了主能源、辅助能源等多能源间流动控制以及负载暂态匹配问题, 这为未来空间核动力平台电力管理系统研究工作奠定了基础。

关键词: 空间核动力; 变配电; 自主控制; 电力管理

中图分类号: V 19 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.06.019

Design of Power Management System at Space Nuclear Power Platform

LIU Shichao, LI Yang, WU Chunyu, JIN Yang, GAO Shaolun

(Shanghai Institute of Space Power Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: Space nuclear power platform is a new integrated spacecraft with power propulsion. In the platform, the power system has the characteristics such as three-phase alternating current (AC) output, multiple and complex working conditions, and many kinds of bus voltage systems. In order to solve the power supply problems of space nuclear power platform, through the demonstration and analyses of the system function, load type, bus system, composition and configuration, working mode, control mechanism, etc., a new power management system architecture for space nuclear power platform is proposed, in which the stable power supply problem based on Brayton thermoelectric conversion system output is solved by the power transformation and distribution system from the perspective of hardware implementation and the problems of multi-energy flow control and load steady-state power supply are solved by the autonomous control system from the perspective of soft control. This lays the foundation for the future research on the power management system of space nuclear power platform.

Key words: space nuclear power; transformation and distribution; autonomous control; power management

0 引言

目前, 航天器能源系统均采用太阳能电池阵作为主能源, 但是, 随着人类航天活动范围不断拓展, 以及未来所执行航天任务日益丰富, 在很多应用场合, 太阳能电池已经无法满足需求。

木星、土星附近的太阳辐射照度非常低, 太阳能电池已经无法满足探测器本身的能量需要, 如图

1所示^[1-2]。由于核电源系统不受太阳光照的限制, 将是空间能源的唯一出路。在高周期雷达观测、太空垃圾清除、全球生态监测等应用背景下, 提出了 100 kW 以上, 甚至达到 MW 级的超大功率需求, 需要大面积太阳能电池阵, 但其姿态控制非常困难^[3-5]。此外, 国内外研究成果表明, 功率达到 100 kW 以上, 与太阳能电池阵相比, 空间核电源系统在功

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2019-10-21

基金项目: 上海市军民融合重大产业资助项目(IMRH-2018-04)

作者简介: 刘世超(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空间新型电源系统技术。

通信作者: 高劭伦(1961—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间飞行器总体设计。

率质量比、功率体积比等方面具有明显优势,如图 2 所示^[6-7]。

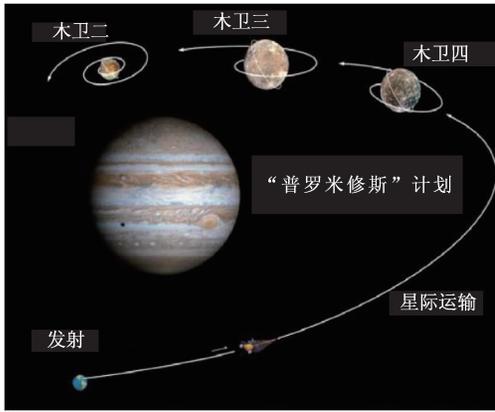


图 1 深空探测任务

Fig.1 Deep space exploration mission

空间核动力平台是指基于核反应堆发电推进平台,其既可为各种负载提供电能,又可提供推进动力,主要由核反应堆、热电转换系统、散热与辐射器、电力管理系统以及电推进系统等组成,如图 3 所

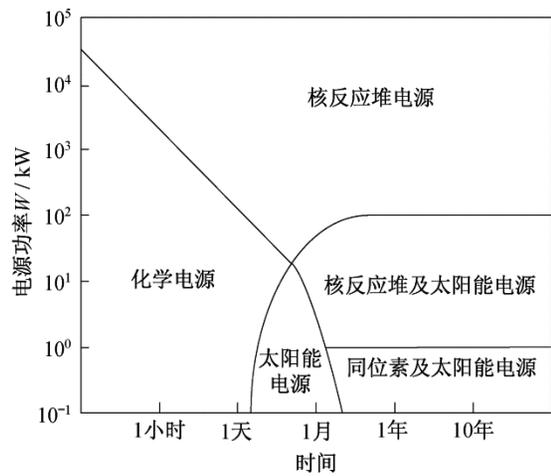


图 2 多种形式能源功率范围与任务周期比较

Fig.2 Comparison of power levels and operating hours of multi-form energy sources

示^[8]。由于布雷顿热电转换方式具有输出功率扩展方便、超大功率下的功率密度高等特点,本文主要面向采用布雷顿热电转换系统的空间核动力平台开展相关研究工作^[9]。

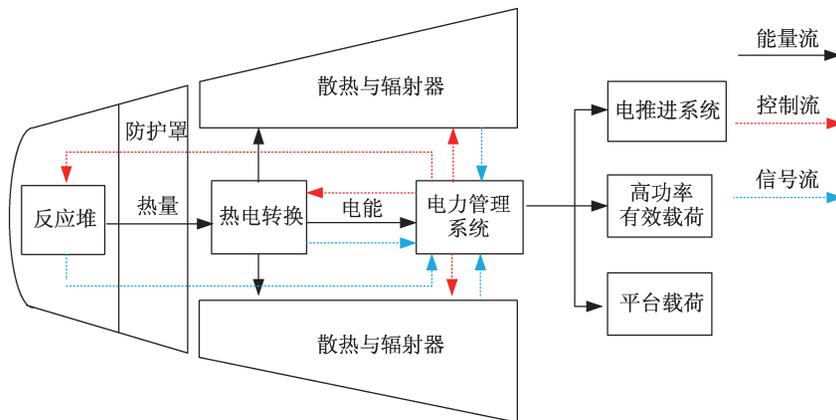


图 3 空间核动力平台系统组成

Fig.3 Configuration of the space nuclear power platform

空间核动力平台电力管理系统完成对由核反应堆产生、经布雷顿热电系统转换的能量进行变换、调节、分配与控制等功能,在全运行周期内,电力管理系统为空间核动力平台各种负载提供电力来源,还为核反应堆、热电转换系统等核发电装置供电。

1 空间核动力平台电力系统特点

空间核动力平台电力系统具有以下几个特点:

1) 交流供电体系。热电系统本质上是反应堆

产生的热能推动热机做功,带动内部发电机发出电能,其输出具有交流特性,即呈“三相四线”、每相之间的相位差恒定。此外,还具有高频率(几百 Hz 甚至 1 kHz)、高电压(几百 V 甚至几 kV)等特点。

2) 多电压母线。负载具有多样性,如高功率载荷(如电推力器、雷达等)功率需求几十 kW,甚至几百 kW,供电电压可达几 kV;高压载荷(如遥感相机、热控系统等)供电电压为 100 V、低压载荷(如综合电子、测控系统等)供电电压是 28 V,多种载荷母

线电压也不一样。

3) 功率瞬态调节。由于核反应堆、热电转换系统自身具有蓄热性,当负载功率发生瞬变时,反应堆的热能产生、热电系统的电能转换等功率调节过程往往需要几分钟甚至更长,反应堆、热电转换系统响应严重滞后于负载变化,无法满足负载要求。

4) 多能源联合供电。核反应堆、热电转换系统作为主能源,太阳能电池阵、蓄电池组作为外部辅助电源,根据主能源工作特点,在启动前,需要外部辅助电源供电;在启动后直至满功率运行前,主能源与辅助电源联合供电;在满功率运行后,外部辅助电源退出供电,当负载功率发生瞬变,外部辅助电源又可进行功率补偿。其中,外部辅助电源中的蓄电池组既可由太阳能电池阵补能,又可由主能源补能。

5) 多运行参数相互匹配。空间核动力平台运行于不同工况,其内部多个参数应准确匹配,如核反应堆出口温度,热电转换系统进口与出口压力、流量以及电动机转速,散热器辐射温度、变配电系

统输出功率等,如果出现某些参数不匹配,有可能造成空间核动力平台组成部分工作异常甚至毁坏,如热电转换系统,严重影响系统运行安全。

2 国外空间核动力平台电力管理系统

在空间核动力平台研究方面,国外以美国和俄罗斯为代表,已经开展了深入研究工作。

2.1 美国

美国“普罗米修斯”计划旨在研制基于反应堆的空间核动力平台,用于探索木星及冰盖卫星等任务,电力控制与分配系统(PC&D)是重要组成部分,其主要由电力管理与分配系统(PMAD)、120 V/28 V 转换器、耗散负载辐射器等组成,如图 4 所示^[10-13]。

PMAD主要由电力管理与分配控制器(PMAD controller)、寄生耗散负载控制器(PLR controller)、降压器(Buck Transformer)、逆变器(Inverter)、整流器(Rectifier)、功率分配装置(SG)等组成,其中,PLR controller通过对大功率航天器负载变化的感

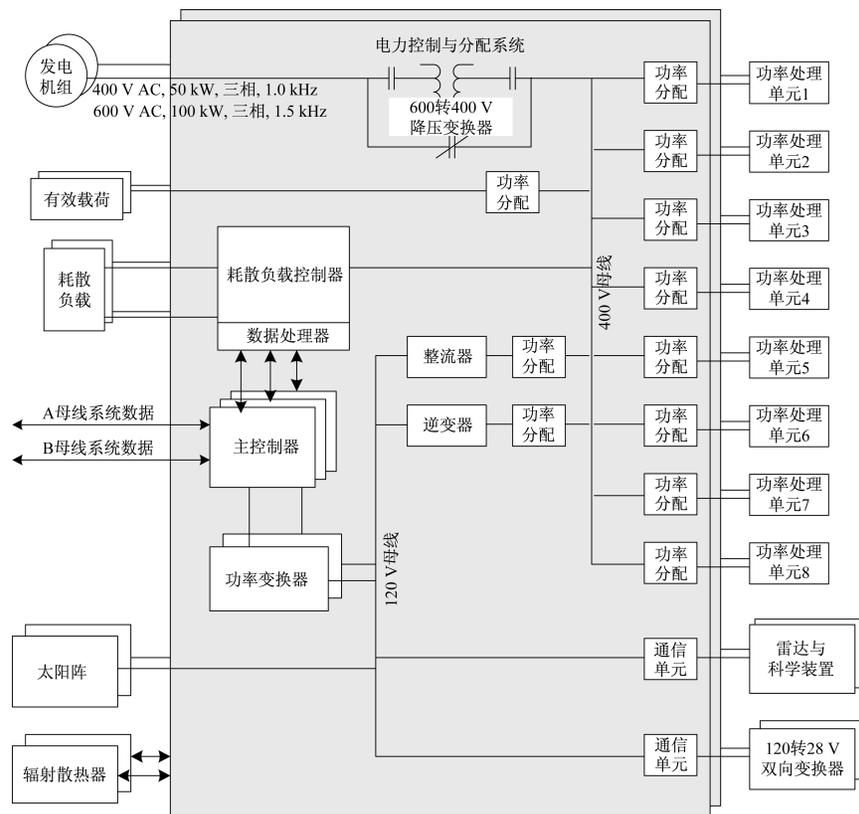


图 4 “普罗米修斯”空间核动力平台电力控制与分配(PC&D)架构

Fig.4 Power control and distribution architecture of Prometheus space nuclear power platform

知,利用脉宽调制控制方法,保证布雷顿热电转换系统负载大小的恒定;Inverter将120 V变换成400 V AC(1 kHz),为布雷顿热电转换系统热机启动、核反应堆冷却回路的冷却泵等提供所需能量;Rectifier实现120 V与28 V之间变换;Buck Transformer将热电转换系统输出600 V AC变换为400 V AC主功率分配母线;PMAD controller对电力管理与分配、热电转换等系统进行指令控制与状态监测;SG实现对各个负载配电控制。

此外,120 V/28 V转换器是双向变换器,既对蓄电池组输出进行转换,提供能量给逆变器以启动热电转换系统,又对太阳能电池阵或整流器输出进行变换,为平台负载提供调节28 V母线,并将28 V系统与高压系统隔离。

2.2 俄罗斯

2009年,俄罗斯提出“基于兆瓦级核能动力装置的运输——动力模块舱”的重大创新项目,拟建造带有核能动力装置的空间运输系统,自动化电力系统是其重要组成部分,主要实现对热电转换系统输出变换、系统功率调节,为核反应堆与热电转换系统、电推力器及其他负载配电^[14-15]。

3 我国空间核动力平台电力管理系统方案探讨

根据空间核动力平台任务需求,针对采用布雷顿热电转换系统的空间核动力平台特点,结合国外相关技术调研情况,我国空间核动力平台电力管理系统主要由两部分组成:变配电系统与自主控制系统,其中,变配电系统主要实现电能变换、分配与调节等功能;自主控制系统主要针对空间核动力平台电力系统运行模式,实现电力系统各组成部分控制功能。

3.1 变配电系统方案

3.1.1 系统功能

变配电系统功能包括:为电推力器或高功率载荷等高压供电;控制平衡负载调节多余能量;为平台其他各种负载配电;为核反应堆、布雷顿热电转换系统、辐射散热器等控制供电;主电源(核发电系统)与辅助电源(光伏电源系统)能量双向变换;系统各设备状态监测及过状态保护。

3.1.2 负载类型与母线体制

变配电系统负载类型与母线体制包括:高功率类载荷,如电推力器、全球监测雷达等,高压母线,电压为kV以上甚至几kV;高压不调节类载荷,如核反应堆执行与保护、热电转换系统执行等装置,一次不调节母线,电压为80~110 V;高压调节类载荷,如核反应堆控制、热电转换系统控制、辐射散热器控制、太阳能电池阵驱动机构等装置,一次全调节母线,电压为 (100 ± 1) V;低压调节类载荷,如切换开关、综合电子、姿态轨道控制、数据测量传输与指令控制等装置,二次全调节母线,电压为 (28.5 ± 0.5) V。

3.1.3 系统组成与配置

变配电系统是由高压供电、高压调压器、供电切换装置、电推力器供电控制模块、平衡负载及其控制器、二次电源、电能控制与变换器等组成,如图5所示。

1) 高压供电。高压供电是由无控整流器、滤波器等组成,用于为电推力器、微波雷达等高功率载荷供电,其中,无控整流器是由多个三相桥式整流器串联,以实现高电压输出;滤波器采用LC形式,将整流器输出电压脉动电压调整到可接受范围。

2) 高压调压器。高压调压器是由可控逆变器等组成,可控逆变器也采用三相桥式拓扑电路,用于调节发电机输出,以解决从空载到满载工作时发电机输出电压跌落问题。

3) 供电切换装置。供电切换装置是由开关装置及其控制逻辑电路等组成,开关装置分为接触器与继电器两种,实现对高功率载荷与电推力器、平台各种负载之间供电切换控制。

4) 平衡负载及其控制器。平衡负载是由金属电阻器组成,实现核动力装置启动与停止、负载变化等工况下功率耗散。

5) 二次电源。二次电源主要是由变压器、不控整流器以及DCDC变换器等组成,可将发电机交流输出变换成一次全调节及不调节直流母线。

6) 电推力器供电控制器。电推力器供电控制器是由除高压电源以外的几种恒流与恒压输出特性的电源组成,根据电推力器工作模式,实现对各种电源供电时序控制,保证电推力器供电需求。

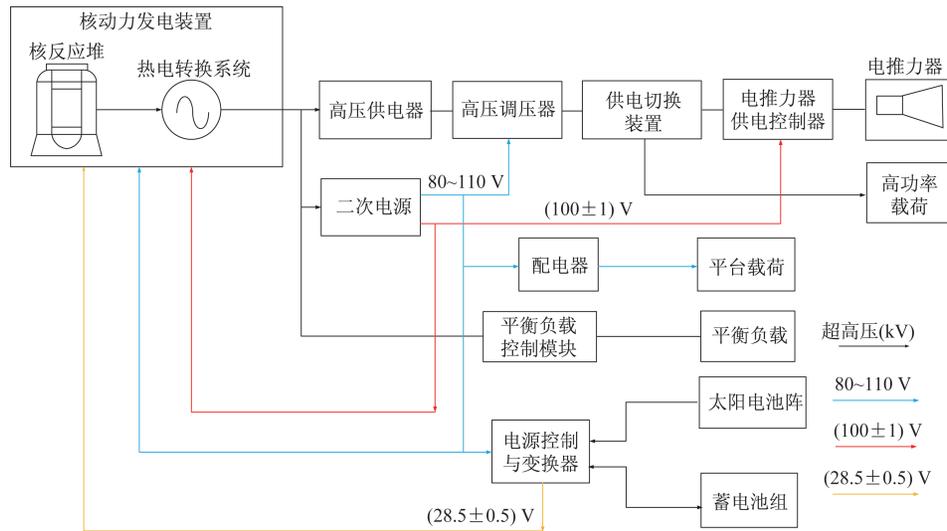


图 5 变配电系统组成与配置

Fig.5 Composition and configuration of power transformation and distribution system

7) 电能变换与控制器。电能变换与控制器可实现二次全调节母线的变换功能,并为核动力装置(核反应堆、热电转换系统)启动供电。

3.2 自主控制系统方案

3.2.1 工作模式

空间核动力平台工作模式分为启动和动力两种。

1) 启动模式。空间核动力平台启动过程大概分为 3 个阶段:准备、电动机拖动、发电机启动,而电力管理系统控制空间核动力平台电力系统其他各组成部分工作,如图 6 所示。

准备阶段。控制反应堆,使其达到次临界状态;以较小回路压力向布雷顿热电转换系统加注少量工质。

电动机拖动阶段。在外部电能供给下,发电机以电动机模式运转,带动布雷顿热电转换系统从低速运转到较额定转速的 50%;控制反应堆达到临界状态,保证核反应堆稳定输出功率;不断提高反应堆输出水平,加大布雷顿热电转换系统回路工质压力,使反应堆出口工质压力、温度与布雷顿热电转换系统入口工质压力、温度保持一致;快速加速布雷顿热电转换系统,使其超过额定转速的 20%。

发电机启动阶段。将发电机从电动机模式切换成发电机模式,降低布雷顿热电转换系统功率,进入额定转速;将发电机连接载荷,同步提高反应堆的功率,使其满功率输出。

2) 动力模式。动力工作模式分为加载和减载

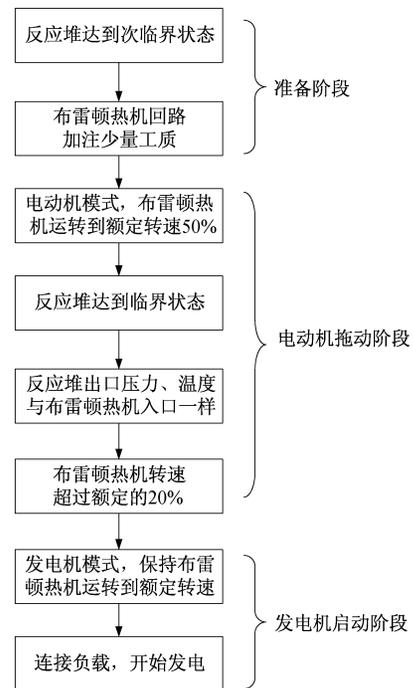


图 6 启动模式下电力管理系统控制其他组成部分工作流程

Fig.6 Workflow of other components under control of power management system in the start-up mode

两种,如图 7 所示。

加载工作模式控制流程如下:控制储能装置放电,提高母线负载供给功率;增加布雷顿热电转换系统入口工质压力,进而提高布雷顿热电转换系统输出功率;提高冷却辐射器的工质流量,保证布雷顿热电转换系统入口前工质流量与其压力匹配;控制核反应堆,提高核反应堆输出热功率。

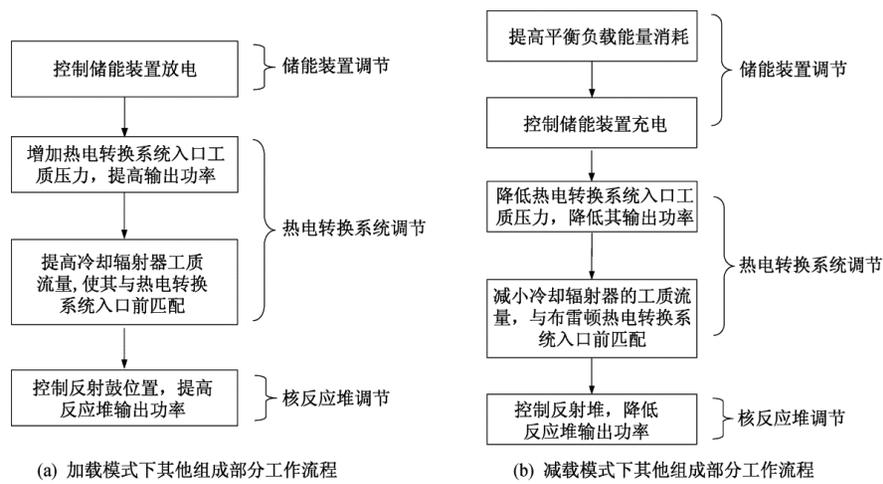


图 7 动力模式下电力管理系统控制其他组成部分工作流程

Fig.7 Workflow of other components under control of power management system in the power mode

减载工作模式过程如下:控制储能装置充电,降低母线负载供给功率;提高寄生负载能量消耗,降低母线负载供给功率;降低布雷顿热电转换系统入口工质压力,降低布雷顿热电转换系统输出功率;减小冷却辐射器的工质流量,与布雷顿热电转换系统入口前压力匹配;控制核反应堆,降低核反应堆输出热功率。

3.2.2 自主控制系统架构

在启动、加减载等几种工作模式中,空间核动力平台可靠安全工作是通过核反应堆、热电转换系

统、辐射散热器以及电力管理系统等各部分相互配合、协同工作而实现,而其又受自主控制系统控制,自主控制系统与核反应堆、热电转换系统、辐射散热器及变配电系统等之间控制关系如图 8 所示。

空间核动力平台自主控制系统主要由计算控制器、通信处理器、模数转换部件等组成;核反应堆、热电转换系统、辐射散热器以及变配电系统等控制单元主要由通信处理器、测量传感器以及动作执行部件等组成。

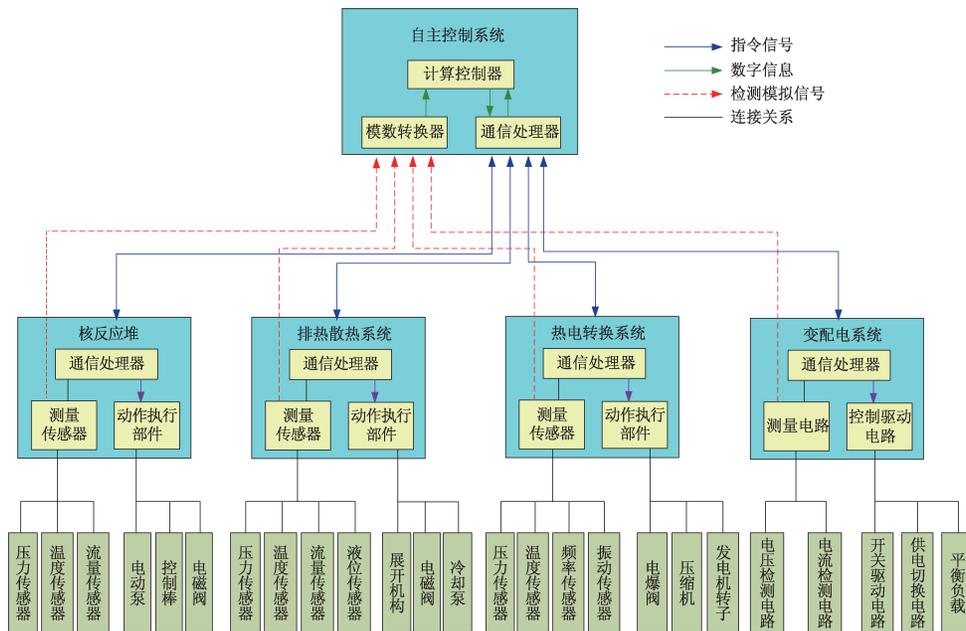


图 8 自主控制系统与其他组成部分间关系

Fig.8 Control relationship between the autonomous control system and other components

自主控制系统通过对空间核动力平台核反应堆、热电转换系统、辐射散热器等组成部分的多个参数检测,监视各组成部分运行状态,并结合当前空间核动力平台状态以及负载工作特性,给各组成部分自身控制系统发送控制指令,保证各组成部分在启动、动力等各个工况下协同配合,保证空间核动力平台系统运行安全。

4 拟突破关键技术

与光伏电源系统相比,空间核动力平台电力管理系统具有显著的不同,需突破多项关键技术如下:

1) 超高压高效交/直流变换技术。针对空间核动力平台热电转换系统输出的高压交流信号无法满足直流负载供电需求的问题,突破新型器件应用、整流电路效率提高、电流谐波对发电机及附近系统的影响抑制等的方法,保证交流/直流混合电力系统内部的运行安全和稳定。

2) 空间核动力平台与负载耦合匹配技术。针对载荷需求功率与核动力装置(核反应堆、热电转换系统)输出功率不匹配的问题,研究基于电能调节方式的分时多级功率调控策略,通过储能装置、平衡负载的利用,满足航天器负载动态变化下的供电需求。

3) 空间核动力平台多源并网供电技术。针对核动力装置启动需要辅助电源供电以及主电源(核动力装置)与辅助电源供电切换等特点,研究静态启动供电、多源平滑切换控制技术,通过发电/电动机一体化、启动负载的利用,实现核动力装置启动时核反应堆与热电转换系统间参数匹配,保证核动力平台启动过程安全可靠。

5 结论

空间核动力平台是一种新型电源推进一体化平台,由于其可提供超大功率与推力,未来将在全球生态监测、轨道间拖船、行星研究、清除太空垃圾等领域得到广泛应用。同时,与传统光伏+蓄电池组电源系统相比,空间核动力平台具有能量供给方式与输出特性不同、系统工况多与运行模式复杂、母线体制众多且压差大等特点,其电力管理技术面临巨大挑战。

本文通过对空间核动力平台任务需求、运行特点分析,提出了空间核动力平台电力管理系统初步方

案,阐述了功能特点、系统组成、工作模式、控制机制以及需突破的关键技术,为后续空间核动力平台电力管理系统技术研究以及相关产品研制奠定了基础。

参考文献

- [1] 朱毅麟. 美国太空核动力计划重开张:“普罗米修斯”计划一瞥[J]. 国际太空, 2004(9):26-30.
- [2] OLESON S R. Electric propulsion technology development for the jupiter icy moons orbiter project [R]. NASA/TM-2004-213290, 2004.
- [3] 苏著亭, 杨继材, 柯国士. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.
- [4] MANKINS J, OLIVIERI J, HEPENSTAL A. Preliminary survey of 21st century civil mission applications of space nuclear power [R]. USA: Jet Propulsion Laboratory, JPL Report JPL-D-3547, 1987.
- [5] ROSEN R, SCHNYER A D. Civilian uses of nuclear reactors in space [J]. Science & Global Security, 1989(1):147-164.
- [6] IAEA. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space [R]. Vienna: IAEA, 2005.
- [7] 胡古, 赵守智. 空间核反应堆电源技术概览[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5):430-442.
- [8] MSSON L S. A power conversion concept for the jupiter icy moons orbiter [R]. NASA/TM-2003-212596, 2003.
- [9] 吴伟仁, 刘继忠, 赵小津, 等. 空间核反应堆电源研究[J]. 中国科学, 2019, 49(1):1-12.
- [10] CASANI J R. Jupiter icy moons orbiter technical baseline review introduction [EB/OL]. [2019-10-12]. <http://www.jpl.nasa.gov/jimo/>.
- [11] ASHCROFT J, ESHELMAN C. Summary of NR program prometheus efforts [C]// Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum. 2007:497.
- [12] TeamJIMO. Jupiter icy moons orbiter (JIMO): an element of the prometheus program [R]. JPL 04-01610-04, 2004.
- [13] BURDGE W, LEVINE B, BREWER G, et al. Space nuclear power plant preconceptual design report for information [R]. Knolls Atomic Power Laboratory, 2006.
- [14] 许春阳. 俄罗斯兆瓦级空间核动力装置研发进展(内部报告)[R]. 北京: 中国核科技信息与经济研究院, 2012.
- [15] Interview: Academician Anotoly Koroteyev, an inside look at Russia's nuclear power propulsion system [R]. 21st Century, Fall/Winter 2012-2013:57-59.