文章编号：2095-4980(2018)01-0176-05

储能电容器在大电流脉冲系统中的应用

郭　庆，任　波

(南京电子技术研究所，江苏 南京 210039)

摘　要：储能电容器是一种容纳大容量电荷的电子器件。脉冲工作时，储能电容器作为储能器件，可提供超大的电流能力；利用储能电容器的充放电特性，可以将电子系统中脉冲电流滤波成为较为平滑的直流电，大大降低低压大电流脉冲电子系统对电源的要求。本文给出了低压脉冲系统中储能电容器使用原则和高分三号卫星中应用实例，通过对卫星供电系统建模仿真，得出了系统最优的电容使用参数。文中的设计方法对其他电子系统设计具有一定的借鉴意义。

关键词：储能电容；脉冲系统；顶降；脉冲重复频率；电磁干扰滤波器

中图分类号：TN952　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201801.0176

Application of energy-storage capacitor in heavy current pulse system

GUO Qing，REN Bo

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039，China)

Abstract：Energy storage capacitors are a kind of electronic devices which can admit charges at large capacity. In pulse operation, energy storage capacitors can provide ultra-large current as energy storage devices. In electronic systems, pulse current can be filtered into smoother DC current based on the characteristics of charge and discharge of energy storage capacitors, which can reduce the demand on power supply greatly. The application principles and examples in GF-3 satellite of energy storage capacitors in low voltage pulse system are discussed. Through the modeling and simulation of the satellite power supply system, the optimal capacitor parameters are obtained. The design method in this paper can provide a reference to other designs on electronic systems.

Keywords：energy-storage capacitor；pulse system；drop；Pulse Repetition Frequency(PRF)；Electromagnetic Interference(EMI)

随着脉冲体制的雷达广泛应用，储能电容在低压脉冲系统中的应用也越来越多[1-3]。高分三号卫星是一颗全极化的 C 波段相控阵 SAR 雷达卫星，其特点是：极高的峰值功率、宽的脉冲宽度和较低的平均功率。系统中如果仅靠电源对脉冲宽度内设备供电，则对电源和供电线路有极高的要求；同时由于线路上很大的脉动电流和电压，系统的电磁兼容性也较差。合理地利用储能电容器的储能和放电功能，则可以将脉冲电流弱化成较为平滑的直流电源，大大减小电源的最高输出，也可以改善系统的电磁兼容性[4-6]。

1　低压储能电容的频率特性

低压储能电容应用于脉冲系统时，有些性能将随着脉冲频率变化而发生变化，使用时应当注意。图 1~图 3 给出了常用于储能的固体钽电容器的频率特性。

1) 电容容量和使用频率关系。电容器的实际容量通常随着使用频率升高而降低，当工作频率为电容的谐振频率时，电容容量将丧失。因此使用的上限频率需要小于电容自身固有谐振频率并应该留有余量。

2) 损耗角正切和频率关系。电容损耗角正切 $\tan\delta$ 是指电容工作时电容器所消耗的有功功率和无功功率的比值。一般来说，电容器损耗角正切随使用频率上升而增加，设计电路时需要注意变化趋势。

3) 电容器等效串联电阻(Equivalent Series Resistance，ESR)和频率关系。电容器等效串联电阻和使用频率之间的关系：$ESR=\tan\delta/(2\pi f_c)$，其中 f_c 为工作频率。

收稿日期：2016-09-23；修回日期：2016-11-05

电容损耗角正切越大，电容器的等效串联电阻也越大。通常情况下，容量越大的电容 ESR 越小，图 3 给出了不同容值情况下钽电容 ESR 和使用频率的关系。

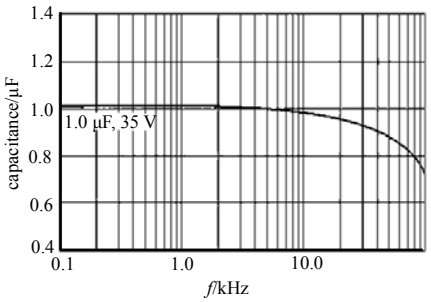

Fig.1 Typical capacitance/frequency curves of tantalum capacitors
图 1 钽电容典型容量/频率曲线

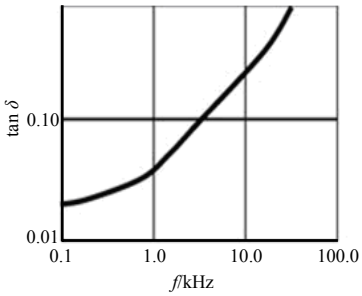

Fig.2 Relationship of tantalum capacitor tan δ and frequency
图 2 钽电容损耗角正切和频率关系

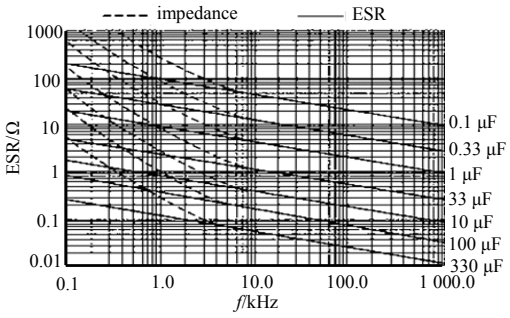

Fig.3 Relationship between tantalum capacitor impedance and ESR and frequency
图 3 钽电容阻抗与 ESR 和频率的关系

2　脉冲系统中储能电容的设计

现给出高分三号卫星供电系统原理图，如图 4 所示。供电系统由一次电源输入，经二次电源 DC-DC 变换后输出系统脉冲负载所需要的直流电源。

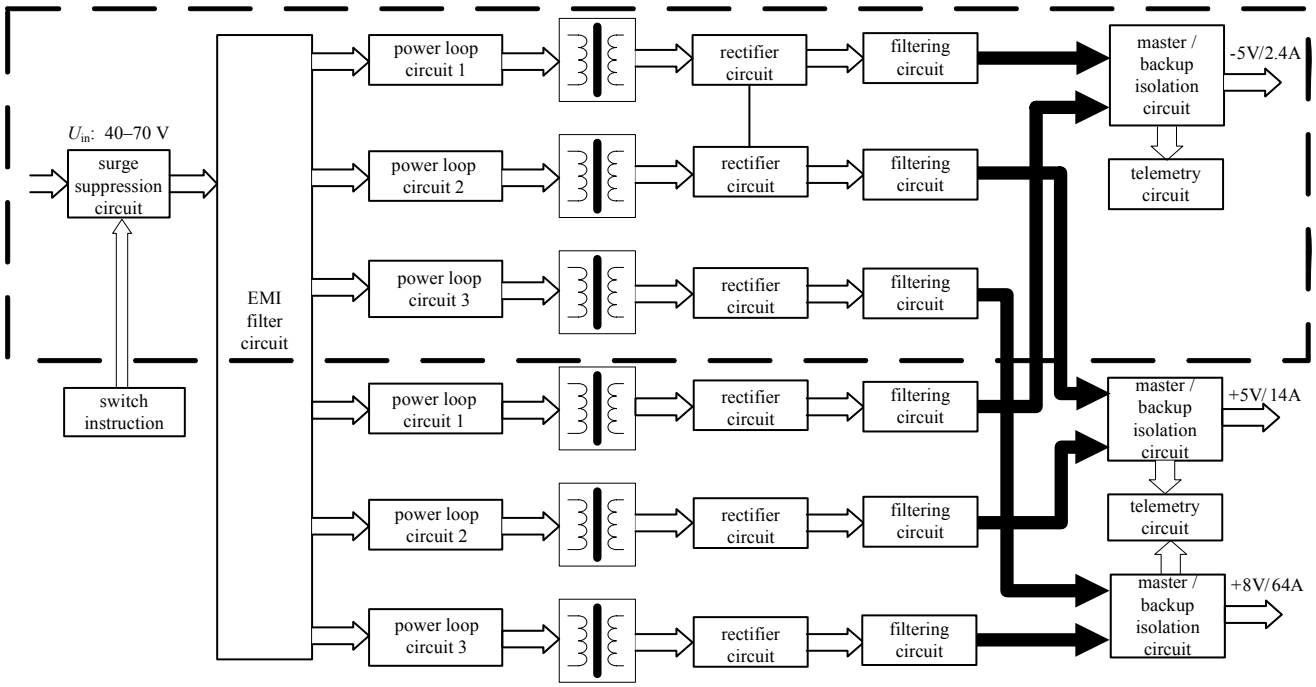

Fig.4 Schematic diagram of power supply system of GF-3 satellite
图 4 高分三号卫星系统供电系统原理图

按图 4 所示原理图建模仿真，仿真模型主要包含几个部分：恒压源输出电压为 8.5 V，输出阻抗为 4 mΩ；传输线缆总线部分，阻抗为 6 mΩ，电感为 0.7 μH；传输线缆两段分线部分(包含分线环及接插件接触电阻)，阻抗为 18 mΩ，电感为 0.1 μH；脉冲负载储能电容为 11×220 μF=2 420 μF，ESR 为 137/11=12.5 mΩ；脉冲负载电阻为 0.2 mΩ。

2.1 脉冲负载端储能电容容量设计

根据脉冲负载工作的功耗、脉冲时间，供电电路的供电能力以及电路的等效电路，储能电容在此工作频率下的等效 ESR、容值等参数按照图 4 的模型进行仿真计算。

供配电网络电缆感抗、接插件接触阻抗明显高于脉冲负载电容并联 ESR，二次电源对脉冲负载电流的瞬时响应较慢，瞬间无法提供足够大的电流，造成储能电容放电过深，从而引起系统脉冲顶降超标以及储能电容器自身功耗不满足 I 级降额的要求，详细结果见表 1。

将脉冲负载附件储能电容量加大 1 倍，如图 5 和图 6 所示，仿真结果表明，在供电电源和供电线路固定的前提下，在靠近脉冲负载端增大电容可以显著降低供电电源的输出能力和供电线缆上的电流波动，减小储能电容在放电周期内的放电深度和功耗，同时也可以改善脉冲负载的顶降指标，详细对比见表 1。

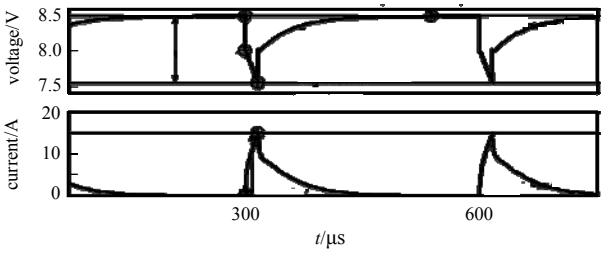

Fig.5 Power response by using 2 420 μF capacitor
图 5 采用 2 420 μF 电容时电源响应

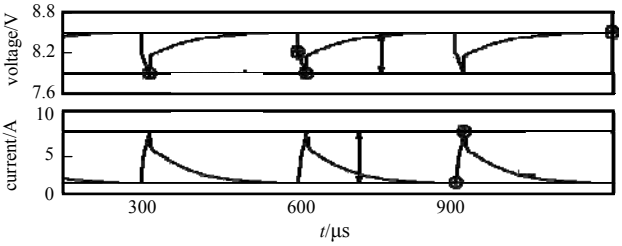

Fig.6 Power response by using 4 840 μF capacitor
图 6 采用 4 840 μF 电容时电源响应

表 1 不同电容量供电系统的性能对比

Table1 Performance comparison of different capacity power supply systems

number of capacitors	capacitor voltage drop/V	capacitance voltage fluctuation/V	capacitor voltage drop by ESR/V	power supply current fluctuation/A	top drop of pulse load/dB	power consumption of capacitor/W
11	0.45	7.55–8.50	0.45	14.90	0.58	0.15
17	0.36	7.80–8.50	0.32	11.59	0.50	0.12
19	0.34	7.85–8.50	0.30	10.86	0.45	0.09
22	0.33	7.89–8.50	0.27	10.20	0.37	0.06

2.2 脉冲供电电路的谐振频率

经图 4 的系统供电模型仿真和测试，此系统二次电源输入电流存在异常振荡问题，实验波形如图 7 所示。

在二次电源输出电流脉动幅度为 24~93 A，输入电流脉动幅度为–3~52 A，输入电流峰值与平均值之比达到了 5.8 倍。输入电流存在反向过零现象，即每个脉冲周期内二次电源会反向为一次电源充电。这将影响一次电源的工作寿命，影响系统的正常运行。

鉴于二次电源输出端容性脉冲性负载的工作特性，二次电源输出电流存在大幅度脉动，此能量反馈至电源输入端，引起输入电流的脉动，同时脉冲负载 PRF 位于电源输入滤波器的谐振频率范围内，谐振峰值过高，进一步加剧输入电流的振荡，最终导致问题现象的产生。

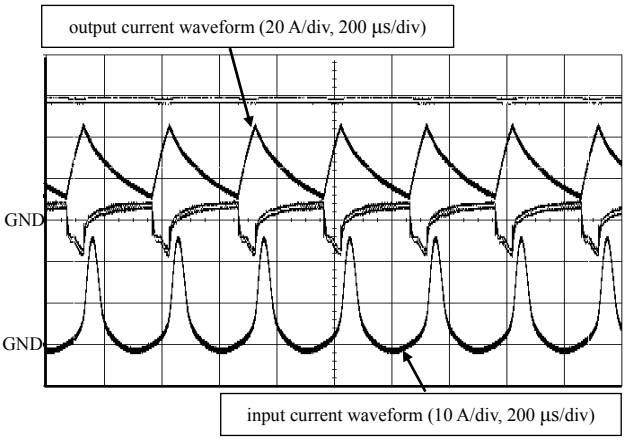

Fig.7 Input and output current waveforms of the secondary electric power supply
图 7 二次电源的输入、输出电流波形

为了解决图 7 所示测试的问题，采取以下措施：

1) 增加二次电源输出电容容量。为了平滑图 7 中二次电源输出电流，将二次电源输出端电容量加大，使得负载脉冲工作时减小从二次电源中抽取电流，从而减小一次电源的输出电流，并且改善供电链路的谐振频率。

2) 将闭环穿越频率调节至 1 kHz 以下。二次电源控制电路环路补偿网络如图 8 所示。将环路补偿电路中参数进行调整：1R82 由 10 kΩ 减小为 1 kΩ，1C82 由 10 nF 增大为 100 nF。可以使控制环路本身的带宽从 3.12 kHz 降低至 312 Hz，从而使得供电链路的谐振频率远离脉冲负载工作的 PRF。

3) 调整输入滤波器参数，增大滤波器阻尼，将谐振峰值抑制在 5 dB 以下。在输入 EMI 滤波器中的差模电感上并联 1 只功率电阻(0.3 Ω,2 W)，并在滤波器输出端并联 1 只 CAK38 型液钽电容(125 V,68 μF)，以此增大滤波器阻尼，抑制振荡。电路原理图如图 9 所示[7]。

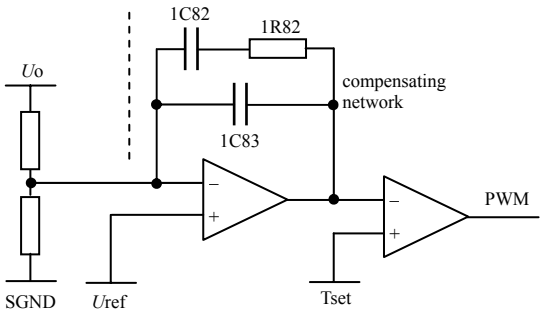

Fig.8 Control circuit compensation network of the secondary electric power supply
图8 二次电源控制电路补偿网络

综合采取以上更改措施，可以有效解决母线输入电流振荡问题，通过实际联试，在各种工况下，输入电流峰峰值≤2 A，并解决了电流倒灌的问题。测试结果如图 10 所示。

经电路改进设计后，二次电源输出电流波动由超过 15 A 平滑到 2 A 以下，输入电流脉动幅度为由 60 A 平滑到 20 A 以内，并解决了电流倒灌和输入电流振荡的问题。

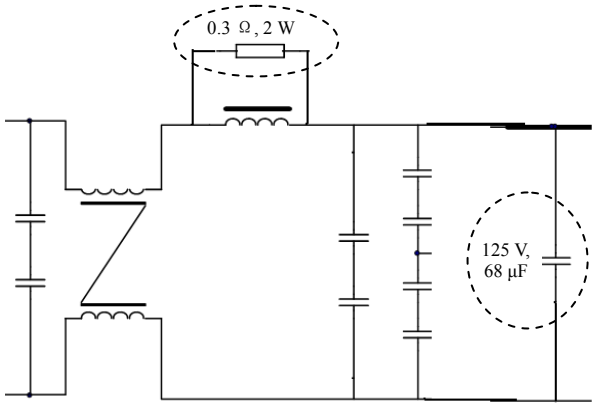

Fig.9 Improved circuit diagram of EMI filter
图 9 EMI 滤波器改进电路图

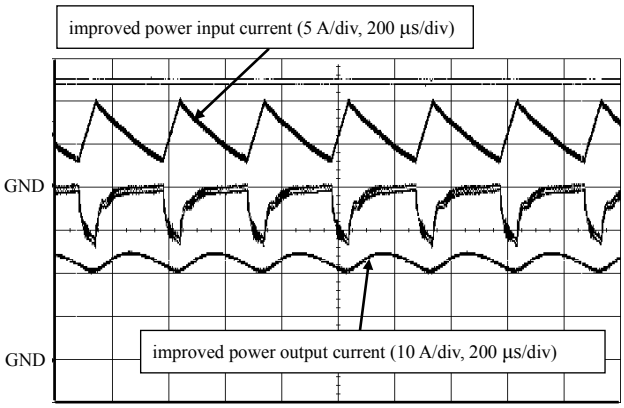

Fig.10 Improved input and output current waveform of the secondary electric power supply
图 10 改进后二次电源的输入、输出电流波形

2.3 储能电容安全性、可靠性设计

1) 禁止对储能电容器施加反压。一般储能电容反压会造成电容器损伤，这种损伤一般为潜在损伤，对系统危害较大，因此使用中要注意不能使用万用表不分极性地随意测量含有储能电容器的电路板接口，避免对储能电容器施加反向电压造成损伤。

2) 电容功率损耗和温度降额。固体钽电容器用在电源滤波器及其他电压、电流快速变化的线路中时，应考虑损耗问题，应对功耗、纹波电流及温度进行降额。如表 1 所示的 F 壳封装的钽电容，其允许的功率损耗为 0.15 W，考虑工作在 85℃，其降额系数为 0.6，因此电容的功耗应小于 0.09 W。

3) 防止短路。目前大量采用的储能电容有短路失效模式，并可能伴随着爆炸和燃烧，给系统安全性、可靠性带来极大的风险。为了防止短路，通常采用的措施有：2 个电容串联，按照大于 0.1 Ω/V 串联电阻和串联保险丝。由于 2 个电容串联，按照大于 0.1 Ω/V 串联电阻措施会极大地增加功耗，在脉冲储能电路中一般不采用。在储能电容前串联保险丝，需要详细计算储能电容瞬态的放电电流，并考虑部分电容失效后瞬态的放电电流变化且留有余量，避免由于部分电容失效后剩余电容放电电流加大带来保险丝熔断的连锁反应。

3　结论

储能电容在脉冲电子系统中使用可以改善系统性能并且降低系统对电源的要求，降低系统研制要求和成本。本文给出了高分三号卫星供电系统使用储能电容的方法，并结合具体使用情况建立了供电链路模型，给出了仿真和测试结果，消除了系统中电源波动大和振荡问题，提高了卫星系统长期工作可靠性，对其他脉冲电子系统设计有借鉴作用。

参考文献：

[1] 夏贤江. 一种 C 波段大功率单脉冲雷达发射机的设计[J]. 现代雷达, 2004,26(8):55-57. (XIA Xianjiang. Design and application of a C-band large power mono-pulse transmitter[J]. Modern Radar, 2004,26(8):55-57.)

[2] 郭庆. C 波段全固态 T/R 组件设计[J]. 微波学报, 2013,29(4):69-73. (GUO Qing. A design of C band solid T/R module[J]. Journal of Microwaves, 2013,29(4):69-73.)

[3] 于大群,朱瑞平,夏琛海,等. 一种卫星接收天线的研究[J]. 现代雷达, 2009,31(1):69-71. (YU Daqun,ZHU Ruiping,XIA Chenhai,et al. A study on an earth station antenna[J]. Modern Radar, 2009,31(1):69-71.)

[4] 张爱民,张航,陈德桂,等. 基于系统辨识的电子设备建模及其应用[J]. 电工技术学报, 2009,24(8):1-5. (ZHANG Aimin,ZHANG Hang,CHEN Degui,et al. Modeling with system identification for electronic devices and its application[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2009,24(8):1-5.)

[5] 刘卫超,魏明,樊高辉. 电路端口电磁脉冲响应仿真分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(6):728-732. (LIU Weichao,WEI Ming,FAN Gaohui. Analysis of simulation about circuit response caused by electromagnetic pulse[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(6):728-732.)

[6] 李许东,王庆国,周星. 线缆网络中的电磁脉冲传输[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(4):467-471. (LI Xudong, WANG Qingguo,ZHOU Xing. Electromagnetic pulse propagation in line networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(4):467-471.)

[7] 王小朋,于平,李东景. 空间有效载荷二次电源抗干扰设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(4):439-443. (WANG Xiaopeng,YU Ping,LI Dongjing. Anti-interference design for secondary power on space payload[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(4):439-443.)

作者简介:

郭　庆(1977-)，男，江苏省句容市人，硕士，高级工程师，主要研究领域为微波封装技术、TR 组件和微波电路设计等.email: guo.uestc@163.com.

任　波(1979-)，男，江苏省宝应县人，学士，高级工程师，主要研究领域为相控阵天线系统.

****

第九届中国石油化工重大工程仪表控制技术高峰论坛

2018 年 4 月 11~15 日 山东省泰安市宝盛大酒店

主论坛十大看点

1. 国际石油化工发展的趋势及国际先进石油化工企业运行经验、国际自动化发展技术。
2. “十三五”石油化工产业发展规划，产业升级规划，安全环保政策和发展机遇。
3. 国家安监总局 2014“116 号文件”以及 2017“212 号文件”实施情况以及在实施过程中的问题、相应的实施标准解读。
4. 石油化工智能工厂标准、数据采集、设备在线监测、自动化控制系统、可视化、通信、安全、节能、环保、优化控制、数据分析与智能决策等关键技术现状、发展、需求及应用展望。
5. 石油化工大型项目解读以及大型 EPC 公司、仪表自动化企业国际工程实施经验总结。
6. 现场仪表、控制阀、过程分析仪表、DCS、FCS、SCADA、工业无线技术、先进控制系统以及工程管理系统的集成应用等。
7. 石油化工自控设计的新标准、新理念、新思路、新模式与工程实践，仪表工程设计软件及其他重要工具、手段的新发展及应用。
8. 石油化工企业自动化、智能化工作存在的问题及改进意见，石油化工智能工厂示范项目解读。
9. 国内外知名仪器仪表、自动化、信息化及相应软件企业新产品、新技术、 新方案及新应用。
10. 仪表自动化产品、人才的国际认证及第三方评估工作。

十一大分论坛

1. 石油化工自动化学术前沿技术专题
2. 煤化工自动化与信息化专题
3. 医药化工自动化与信息化专题
4. 独立炼厂自动化技术与安全运行专题
5. 石油化工设备状态监测与健康专题
6. 在线分析仪表系统设计与优化运行专题
7. 控制阀设计运维专题
8. 生产与过程安全及安全仪表技术专题
9. 现场仪表设计运维专题
10. 石油化工信息安全与信息技术专题
11. 油气储运信息化专题

四大重点工作

一、邀约会议代表

（一）国资委、工信部、中国科协、石化联合会等有关部门的领导；中石化、中石油、中海油以及延长石油、中化集团、神华集团及其他大型中央企业、地方大型石油化工企业、大型民营及合资石油化工企业发展规划、设备管理、仪表自控、信息技术相关负责人。

（二）石油化工装置安装维保单位负责人；石油化工行业、国家储备、总后、空军以及城市燃气管网系统的相关工程公司、设计院、研究院等单位仪表自控、信息技术设计负责人。

（三）石油天然气、炼油化工、煤化工、医药化工、油气储备库、长输管线及城市管线、油气销售企业的仪表自动化、机动/设备、安全环保部门、计量等部门的管理人员、技术人员。

（四）国内外仪器仪表、控制系统、信息技术及设备的供应厂商。

二、供需对接洽谈

会议期间，计划进行 30 个技改和升级项目现场需求对洽。针对拟在建、改扩建石油化工自动化工程，以及企业生产运营中存在的疑难技术问题进行对接交流解决、洽谈合作。

三、石油化工新产品新技术展示

现场展示满足石油化工工程需要的温度、压力、流量、物位、控制阀、在线分析、变送器、无线仪表、安全类仪表及系统、称重仪表、自动化软件、专用工具与机柜、特色线缆、工控机、服务器、大屏幕、网络安全设备、安防监控、设备在线监测及诊断、智能巡检、工业物联网等新产品新技术。

四、征文、论文评选及发表

会议从即日起开始征文（中文、英文）工作，截止日期为 2018 年 2 月 28 日。凡是与石油化工仪表自动化工程设计、设备运行维护、物装采购、产品选型、解决方案、标准应用相关的内容都属于本次征文的范围。本次论坛将编辑 《2018 中国（国际）石油化工智能工厂科技高峰论坛暨第九届中国石油化工重大工程仪表控制技术高峰论坛论文集》，发表通过审核的论文。论坛将组织专家委员会进行论文评选，对优秀论文颁发证书并给予奖励。同时，推荐优秀中文论文到《仪器仪表用户》等期刊正刊发表，推荐优秀的英文论文收录到 Springer 出版集团的 LNEE 丛书（EI 检索）。

对优秀的中文论文、英文论文，优秀的大会主题报告，优秀的产品解决方案进行评选，颁发奖项。

会议联系人　李涛 15624975982　邮箱 lit@cis-pic.org.cn