

## 基于功放、功分技术的微波信号源扩展方法研究\*

张 恺, 许云鹏, 陈秋菊, 李 秦, 柴熙源, 吴丛凤, 唐运盖

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 量子超导计算芯片的测试需要几十甚至上百路高频微波信号输入, 普通微波信号源一般只有 1~2 个通道, 远远不能满足测试需求; 若集成多个信号源以扩展信号通道, 不但体积庞大, 成本昂贵, 信号源的同步控制也是一个难题。针对上述问题, 基于功放及功分技术, 提出了对微波信号源的一路输出进行等功率扩展的方法, 设计了集成了衰减器、功放和功分模块的信号源等幅扩展装置。利用微波信号源、频谱仪、网分等测量仪器搭建实验平台, 对所设计信号源扩展装置的性能开展实验研究, 同时验证基于功放、功分技术的微波信号源扩展方法。实验结果表明, 所提出的方法能保证所扩展信号的中心频率、功率与源信号高度一致, 各扩展通道的信号相位稳定性好, 相位长期漂移控制在 $\pm 1^\circ$ 以内, 满足了量子超导计算芯片测试的需求。

**关键词:** 量子计算; 芯片测试; 射频信号源; 通道扩展; 功放; 功分

中图分类号: TN62

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222865

中文引用格式: 张恺, 许云鹏, 陈秋菊, 等. 基于功放、功分技术的微波信号源扩展方法研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(7): 100-104.

英文引用格式: Zhang Kai, Xu Yunpeng, Chen Qiuju, et al. Research on microwave signal source expansion method based on power amplifier and power division technology[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(7): 100-104.

## Research on microwave signal source expansion method based on power amplifier and power division technology

Zhang Kai, Xu Yunpeng, Chen Qiuju, Li Qin, Chai Xiyan, Wu Congfeng, Tang Yungai

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The test of the superconducting quantum computing chip requires dozens or even hundreds of high-frequency microwave signal inputs. The ordinary microwave signal source generally only has 1~2 channels, which is far from meeting the test requirements. If multiple signal sources are integrated to expand the signal channel, it will be not only bulky and expensive, but the synchronization control of the signal source will be also a difficult problem. Aiming at the above problems, based on the power amplifier and power division technology, in this paper, a method of equal-amplitude expansion of one output of the microwave signal source has been proposed, and a signal source equal-amplitude expansion device integrating attenuator, power amplifier and power division module has been designed. Then an experimental platform has been built with microwave signal source, spectrum analyzer, network analyzer and other measuring instruments to carry out experimental research on the performance of the designed signal source expansion device and verify the microwave signal source expansion method based on power amplifier and power division technology. The experimental results show that the proposed method can ensure that the amplitude and frequency of the extended signal are highly consistent with the source signal, and the signal phase of each extended channel can be kept stable for a long time, which meets the requirements of superconducting quantum computing chip testing.

**Key words:** quantum computing; chip testing; RF signal source; channel expansion; power amplifier; power divider

## 0 引言

量子计算是一种遵循量子力学规律调控量子信息单元进行计算的新型计算模式<sup>[1]</sup>。量子计算机的理论模型是用量子力学规律重新诠释的通用图灵机<sup>[2]</sup>。从计算的效率上, 由于量子力学叠加性的存在, 某些已知的量

子算法在处理问题时速度要大大快于传统的电子计算机<sup>[3-4]</sup>。量子计算芯片本身的物理架构是多输入多输出, 在芯片测试过程中, 需要几十甚至上百路高频微波信号作为输入<sup>[5-6]</sup>。量子超导计算芯片的测试需要几十甚至上百路高频微波信号输入, 普通微波信号源一般只有 1~2 个通道, 远远不能满足测试需求; 若集成多个信号源以扩展信号通道, 不但体积庞大, 成本昂贵, 信号源的

\* 基金项目: 中国科学技术大学青年创新基金(WK2100000027)

同步控制也是一个难题。

本文针对上述问题,基于功放及功分技术,提出了对微波信号源的一路输出进行等功率扩展的方法,设计了集成了衰减器、功放和功分模块的信号源等幅扩展装置。利用微波信号源、频谱仪、网分等测量仪器搭建实验平台,对所设计信号源扩展装置的性能开展实验研究,同时验证基于功放、功分技术的微波信号源扩展方法,并对实验结果进行了分析。

## 1 基于功放、功分技术的微波信号源扩展方法及装置设计

### 1.1 扩展方法

由于功放的特性是将 $-10\text{ dBm}$ 以下的小信号线性放大 $20\text{ dB}$ 以上,因此想要将信号源的某一路输出信号等功率扩展,必须先使用衰减器将原始信号衰减成 $-10\text{ dBm}$ 以下的小信号,然后在功率放大器的线性范围内尽可能低噪声地放大,再经过功率分配器一路到多路分配后,根据输出大小选择合适的衰减器将信号功率衰减到原始信号的大小,才能实现等功率扩展,即整个扩展链路的增益为 $0\text{ dB}$ 。上述扩展方法的流程如图1所示。这种扩展方法需要特别注意功放的 $1\text{ dB}$ 压缩点以及功分的相位稳定性,它们分别决定了扩展装置输出信号的功率大小及相位稳定程度能否满足量子超导计算芯片测试的需要。

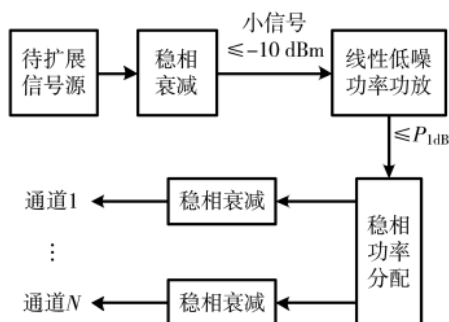


图1 信号源等功率扩展流程

### 1.2 扩展装置设计

按照图1的信号源扩展流程,等功率扩展装置的结构如图2所示。

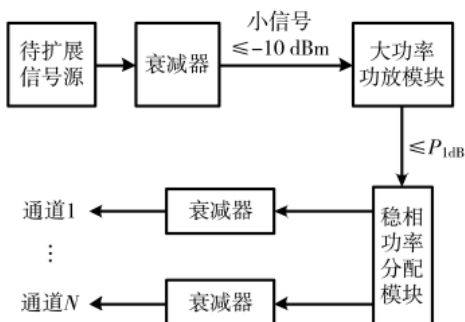


图2 信号源等功率扩展装置结构

而实际情况是,信号源的输出功率一般不会低于 $0\text{ dBm}$ ,最高需要 $23\text{ dBm}$ ,因此扩展装置需采用 $1\text{ dB}$ 压缩点要高于 $23\text{ dBm}$ 的功放,同时选取相位稳定性能优良的功分和衰减器。经过综合比较,功放选用美国PE公司的大功率功放模块PE15A3506,功分选用国产模块RS4-W2080-S,衰减器选用瑞贝斯可调衰减器RBS-70-12.4-6-5W,器件的性能参数列于表1~表3中<sup>[7-9]</sup>。

表1 PE15A3506 性能参数

主要参数	值
最大功率输出	2 W (33 dBm)
频率最小值/GHz	6
频率最大值/GHz	12
典型增益/dB	47
增益平稳度/dB	1.5
噪声因数最大值/dB	6.5
三阶交调/dB	42
输入驻波比	2:1
输出驻波比	2:1
接口类型	SMA

表2 RS4W2080-S 性能参数

主要参数	值
频率范围/GHz	2~8
插入损耗/dB	$\leq 1.2$
隔离度/dB	$\geq 20$
输入驻波比	$\leq 1.5$
输出驻波比	$\leq 1.4$
增益不平衡度/dB	$\leq 0.4$
相位不平衡度/(°)	$\leq \pm 5$
耐受功率/W	50
接口类型	SMA

表3 RBS-70-12.4-6-5W 性能参数

主要参数	值
频率范围/GHz	DC~12.4
衰减范围/dB	0~70
衰减步进/(dB/steps)	1
最大驻波比	1.60
插入损耗/dB	$\leq 1.25$
最大输入功率/W	5
衰减精度	$\pm 0.5\text{ dB}$ (0~9 dB) $\pm 1.0\text{ dB}$ (10~19 dB) $\pm 1.6\text{ dB}$ (20~70 dB)
接口类型	SMA

## 2 实验研究及数据分析

### 2.1 实验平台搭建

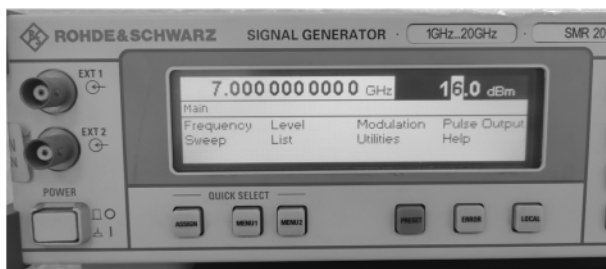
为了验证所提出方法的可行性与效果,搭建了实验平台。实验平台由信号源、扩展装置、直流稳压电源、频谱仪及网络分析仪组成,各仪器、装置之间采用同等长

度的机械稳相电缆线连接。先将扩展装置上电,再将待扩展信号源接入,由频谱仪监测所设计扩展装置4路输出通道的信号,验证这4路扩展信号与源信号的功率、频率一致性;再用网络分析仪的S21模式测试各个扩展通道的相位稳定性。

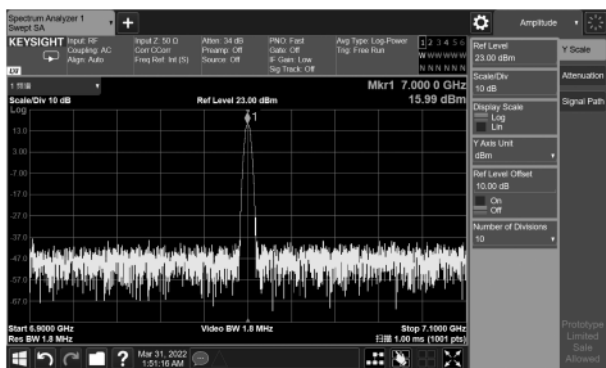
在量子超导计算芯片测试中使用的信号源为罗德施瓦茨 SMR20,其输出频率为1 GHz~20 GHz,输出功率范围为-30 dBm~+20 dBm;频谱仪选用安捷伦 N9020A;网分选用安捷伦 E5071C。

### 2.2 信号源单通道 C 波段扩展实验

实验将在 C 波段(6~8 GHz)对扩展装置的性能进行测试。首先,将扩展装置上电,同时对需要扩展的信号源进行设置。将信号源输出频率设为 6 GHz,幅度设为 16.00 dBm,连续波(CW)模式,频谱仪测得原始信号的频谱如图 3 所示。



(a)原始信号参数



(b)原始信号频谱

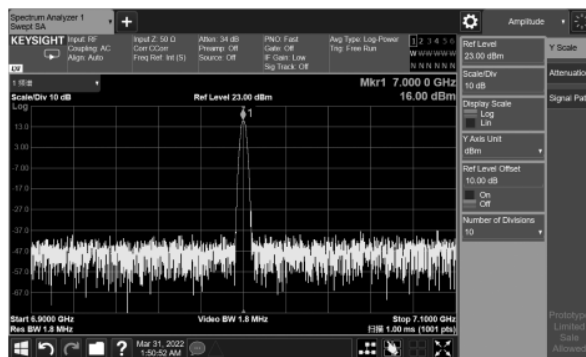
图3 待扩展通道的原始信号参数及频谱

接着使用频谱仪测试扩展装置的5路输出信号的频谱,如图4所示。

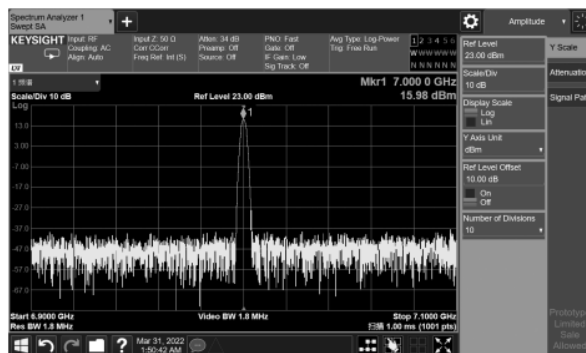
重复上述实验步骤,对 C 波段 6 GHz、7 GHz、8 GHz 3个频点进行扩展信号中心频率及功率的测试,结果列于表4中。

由于功放的频率响应在 6 GHz、7 GHz、8 GHz 处略有不同,因此扩展装置4个通道的输出有所变化。但在同一频率点,4路扩展信号的中心频率、功率与源信号保持高度一致。

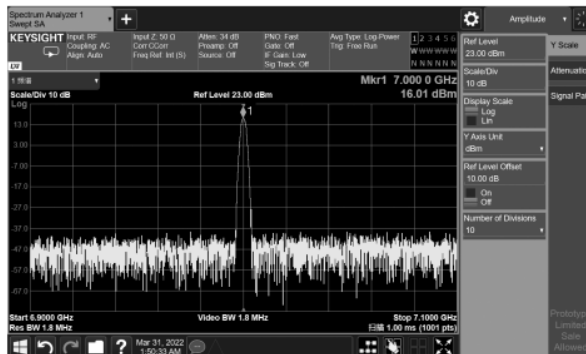
接着,再使用网络分析仪测量4路扩展通道的相位



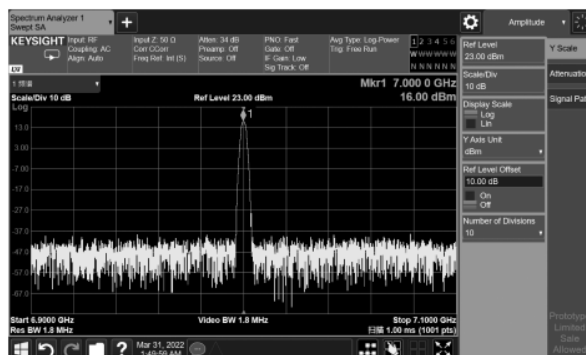
(a)扩展通道 1



(b)扩展通道 2



(c)扩展通道 3



(d)扩展通道 4

图4 4路扩展通道输出信号的频谱

一致性,扫描范围为6~8 GHz,扫描步进为 3 kHz,如图5所示。将 6 GHz、7 GHz、8 GHz 作为标记点,每隔 1 h 记录4个通道的相位,每个频点记录 15 h 的数据,上述数据列于表5中。

表4 各路扩展通道输出信号的幅度

通道	(dBm)		
	6 GHz	7 GHz	8 GHz
源信号	16.01	15.99	16.00
通道1	16.02	16.00	16.03
通道2	16.03	15.98	16.03
通道3	16.00	16.01	16.04
通道4	16.01	16.00	16.02

表6 扩展通道输出信号相位的长时间稳定性

通道	(°)		
	6 GHz	7 GHz	8 GHz
通道1	0.024 362	0.012 744	0.399 569
通道2	0.359 482	0.379 143	0.481 852
通道3	0.367 233	0.568 807	0.544 99
通道4	0.410 714	0.227 309	0.284 471

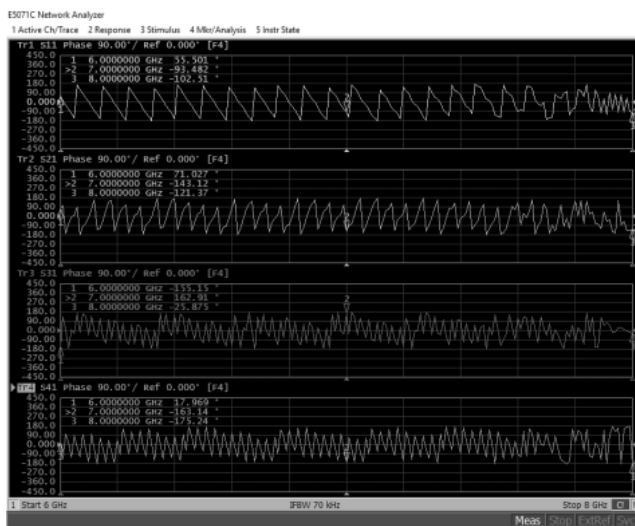


图5 使用网分测量4路扩展通道输出信号的相位

对上述相位数据做标准差,该标准差体现的是每个通道在不同频率点的相位稳定性,实验结果见表6。

综合上述实验结果,可见所设计的扩展装置在C波段能对信号源有效地进行信号的等功率扩展,4路扩展信号在功率、频率上与原信号高度一致,而且每路扩展信号的相位稳定性好,相位长期漂移控制在 $\pm 1^\circ$ 以内,满

足了量子超导计算芯片测试的要求。

### 3 结论

本文基于功放及功分技术,提出了对微波信号源的一路输出进行等功率扩展的方法,设计了集成了衰减器、功放和功分模块的信号源等幅扩展装置。利用微波信号源、频谱仪、网分等测量仪器搭建实验平台,对所设计信号源扩展装置的性能开展实验研究,同时验证基于功放、功分技术的微波信号源扩展方法。实验结果表明,所提出的方法能保证所扩展信号的中心频率、功率与源信号高度一致,各扩展通道的信号相位能够保持长时间稳定,满足了量子超导计算芯片测试的需求。

### 参考文献

- [1] 班冬松,唐培松,陈子钰,等.超导和自旋量子比特测控芯片架构研究[J].中国集成电路,2021,30(10):51-58.
- [2] 中国科学技术大学成功研制62比特可编程超导量子计算处理器[J].信息安全,2021,21(6):97.
- [3] 中国科学家研制成功新型可编程光量子计算芯片[J].环境技术,2021,39(2):2-3.
- [4] 国防科技大学成功研制新型可编程硅基光量子计算芯片[J].信息安全,2021,21(4):98.
- [5] 郭邦红,胡敏,毛睿,等.量子保密通信与量子计算[J].深圳大学学报(理工版),2020,37(6):551-558.
- [6] 刘嶝,李舒啸,李海欧,等.硅半导体量子计算进展[J].信

表5 扩展通道的信号相位

(°)

序号	通道1			通道2			通道3			通道4		
	6 GHz	7 GHz	8 GHz	6 GHz	7 GHz	8 GHz	6 GHz	7 GHz	8 GHz	6 GHz	7 GHz	8 GHz
1	55.491	-93.476	-101.84	70.911	-143.35	-121.68	-155.55	161.98	-26.644	18.651	-162.99	-174.68
2	55.492	-93.476	-101.86	70.921	-143.36	-121.68	-155.48	162.00	-26.596	18.666	-163.00	-174.68
3	55.491	-93.480	-102.08	70.849	-143.37	-121.69	-155.35	162.22	-26.392	18.812	-162.77	-174.39
4	55.550	-93.505	-101.43	71.740	-142.43	-120.50	-154.52	163.62	-25.101	18.857	-162.67	-174.85
5	55.546	-93.504	-101.67	71.725	-142.46	-120.52	-154.53	163.58	-25.148	18.912	-162.58	-174.80
6	55.546	-93.505	-101.72	71.744	-142.41	-120.49	-154.53	163.65	-25.107	18.935	-162.55	-174.77
7	55.555	-93.507	-101.17	71.791	-142.36	-120.47	-154.51	163.64	-25.025	18.256	-163.02	-174.92
8	55.541	-93.497	-101.36	71.582	-142.56	-120.68	-154.75	163.42	-25.337	18.264	-162.91	-174.83
9	55.525	-93.495	-101.64	71.374	-142.78	-120.95	-154.96	163.17	-25.609	18.136	-163.02	-175.02
10	55.518	-93.484	-101.90	71.264	-142.88	-121.14	-154.94	163.14	-25.650	18.125	-163.01	-175.10
11	55.506	-93.480	-102.19	71.087	-143.08	-121.33	-155.15	162.94	-25.900	17.933	-163.19	-175.26
12	55.507	-93.479	-102.42	71.111	-143.10	-121.31	-155.09	162.92	-25.846	18.007	-163.14	-175.21
13	55.499	-93.476	-102.29	70.987	-143.17	-121.48	-155.22	162.84	-25.999	17.895	-163.21	-175.33
14	55.501	-93.482	-102.51	71.027	-143.12	-121.37	-155.15	162.91	-25.875	17.969	-163.14	-175.24
15	55.491	-93.472	-102.25	70.881	-143.23	-121.61	-155.39	162.75	-26.198	17.815	-163.27	-175.37



8F%AF%E8%B0%83%E8%A1%B0%E5%87%8F%E5%  
99%A8.pdf.

[7] PASTERNAK.PE15A3506 datasheet[EB/OL].(2014-xx-xx)  
[2022-04-14].<https://www.pasternack.cn/images/ProductPDF/PE15A3506.pdf>.

[8] 泰莱微波.RS4W2080-S datasheet[EB/OL].(2014-xx-xx)  
[2022-04-14].<http://www.talentmw.com/upload/RS4W2080-S.pdf>.

[9] 苏州瑞贝斯电子科技有限公司.RBS-70-12.4-6-5W data-sheet[EB/OL].[2022-04-14].<http://www.rebes.net/folder/%E5%8F%AF%E8%B0%83%E8%A1%B0%E5%87%-8F%E5%99%A8/6%E7%B3%BB%E5%88%97%E5%->

张恺(1982-),男,博士,副研究员,  
主要研究方向:超导高频、射频微波技术  
以及光电信号检测与处理技术。

陈秋菊(1982-),通信作者,女,博士,副研究员,主要研究方向:射频微波与信号处理技术,E-mail:qqchern@ustc.edu.cn。



扫码下载电子文档

架构设计与原型系统实现[J].计算机工程与科学,2020,42(12):8.

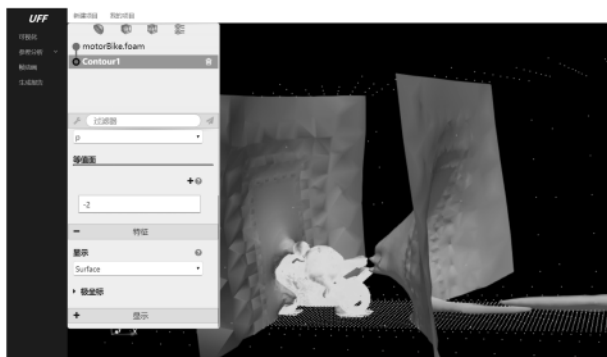


图 6 等值面图测试结果

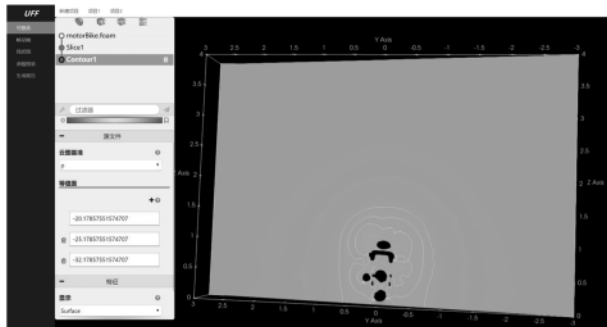


图 7 等值线图测试结果

[4] 倪小丹,刘金武,高为国.基于 K3PREP 的流体动力学计算(CFD)的块和网格生成规则[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2003, 13(1): 27-29.

[5] 杨勇.基于 SolidWorks 的 CFD 前后处理软件的设计与实现[D].重庆:重庆大学,2008.

[6] 孙晗琦.并行计算在计算流体力学中的研究[D].大连:大连理工大学,2005.

[7] 陈永, 张建海, 刘会娟, 等. 基于 Surfer 的有限元后处理等值线图批处理程序开发[J]. 物探化探计算技术, 2005, 27(2): 181-184.

[8] 马千里. CFD 非结构化网格流场体可视化方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.

[9] CANNUHLAR. Web application messaging protocol (WAMP) [EB/OL]. (2018-xx-xx)[2021-06-22]. <https://wamp-protocol.org/>.

[10] WSLINK. Wslink , provide easy , bi-directional communication between a python server and javascript or C++ client over a websocket[EB/OL].(2020-xx-xx)[2021-06-22].<https://kitware.github.io/wslink/>.

[11] PARAVIEW . ParaView/Python scripting [EB/OL]. (2019) [2021]. [https://www.paraview.org/Wiki/ParaView/Python\\_Scripting](https://www.paraview.org/Wiki/ParaView/Python_Scripting).

[12] 刘庆彬, 潘懋, 刘洁, 等. 基于 ParaView 的 Abaqus 有限元输出结果的可视化与虚拟现实[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 9.

(收稿日期:2021-06-22)

李佰文(1995-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:智能信息处理,E-mail:lbw0228@126.com。

淮晓永(1973-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:智能软件工程、云计算。

高若辰(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:智能信息处理。



扫码下载电子文档

本文通过对 ParaView 等模块进行服务化封装,设计实现了一种基于云计算环境的后处理服务框架。这种“云+端”的后处理服务架构同时具有服务器端的高性能和客户端的便捷性,实现了云端协同的优化计算,且具有良好的可扩展性。

- [1] 李建东, 胡光初. 混合网格大规模并行自主 CFD 软件研发进展[C]//第十六届中国 CAE 工程分析技术年会, 2020.
- [2] 庞润芳, 郑坤灿, 任雁秋, 等. 关于 CFD 流场后处理软件的开发及应用[J]. 现代电子技术, 2017, 40(20): 61-63, 66.
- [3] 郭晓威, 李超, 刘杰, 等. 一种高可扩展的通用 CFD 软件

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所