

可控吸气实时抑制叶顶密封气流激振的研究*

何立东, 邢健, 丁磊, 尹德志

(北京化工大学诊断与自愈工程研究中心 北京, 100029)

摘要 利用叶顶吸气抑制密封气流激振, 实现对密封气流激振的主动实时控制。开发了一套基于 LABVIEW 的可控闭环流量调节系统, 可根据叶片振动幅值反馈调节喷射流量或吸气流量。在叶片两侧为光滑密封和蜂窝密封两种条件下, 实验研究了闭环可控吸气对叶顶密封气流激振的控制。研究表明, 吸气流量随叶片振动幅值变化而实时调节, 叶片振动幅值被实时控制在工况设定的阈值内。光滑密封条件下, 闭环可控吸气减振效果能达到 30%, 蜂窝密封条件下的减振效果可提高到 40%, 主动控制与被动控制结合的效果更佳。

关键词 叶顶密封气流激振; 主动控制; 吸气; 蜂窝密封; 减振

中图分类号 TK263.3; TP29; TP272

引言

流动控制技术是流体力学研究领域的一个热点问题, 它在改善飞行器和叶轮机性能方面有着巨大的应用潜能。早在 1904 年, Prandtl 就开展了利用喷气或吸气来减缓气流分离的研究。后期的大量研究都表明, 稳恒射流、脉动射流、合成射流等各类射流及吸气均能有效减缓叶片边界层气流分离, 减小气流阻力^[1-2], 而且对叶轮机旋转失速和喘振有一定的控制作用, 有利于提高机组运行稳定性^[3-4]。叶轮机机械上射流和吸气的研究主要集中在提高机组静特性上, 针对动态特性改善的研究较少。反旋流^[5-6]是利用射流来控制机组动态特性的一种主要方法, 它能有效抑制密封气流激振。动叶片叶顶吸气方法也能有效抑制叶片振动^[7]。

恰当的反旋流对于减缓迷宫腔内的气流激振具有明显的作用, 但反旋流的流量等参数不能根据需要进行调节, 参数不合理时反而会导致转子振动加剧^[8]。课题组前期研究了基于单片机的流量开关控制系统^[9], 与传统反旋流技术结合, 突破了传统反旋流存在的不足, 但只能实现吸气或喷气装置开和关两种状态的自动调节。

笔者开发了一套基于 LABVIEW 的多点可控闭环流量调节系统, 可根据旋转设备运行工况对吸

气流量或反旋流射流量进行实时自动闭环控制。通过模拟实验, 研究了该系统控制吸气量时对叶片振动的影响规律, 并研究了该主动控制方法与蜂窝密封被动控制方法^[10-12]结合抑制密封气流激振的效果。本研究成果为旋转机械密封气流激振提供了一种主动控制的新方法, 开发的叶片振动主动控制系统有一定的工程应用价值。

1 实验系统与设计

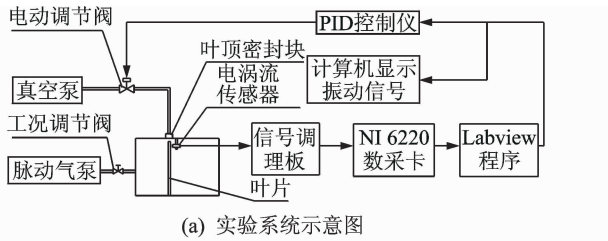
1.1 实验系统

实验系统主要由叶片装置和闭环流量调节系统两大部分组成, 实验系统示意图和实物图如图 1 所示, 图 2 为吸气嘴和叶片侧边蜂窝密封。

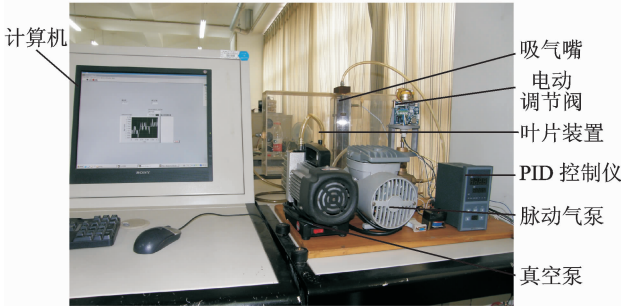
脉动气泵通过工况调节阀与叶片装置连接, 脉动气流激励叶片振动。叶顶光滑密封块上设计有通气结构, 通过电动调节阀与外部气源连接, 与真空泵连接即可进行吸气抑振实验。叶片后上方装有电涡流位移传感器, 用来采集叶片振动信号。可控流量调节系统以该振动信号作为反馈信号, 控制电动调节阀的开度, 从而控制叶顶吸气流量大小, 实现实时闭环控制。

叶片侧边和顶部密封间隙为 0.2 mm, 侧边密封结构拆装方便, 实验设计了光滑和蜂窝两种侧边

* 教育部博士点基金资助项目(20110010110009); 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2012CB026000); 北京市教育委员会共建专项资助项目
收稿日期: 2013-01-10; 修回日期: 2013-04-11



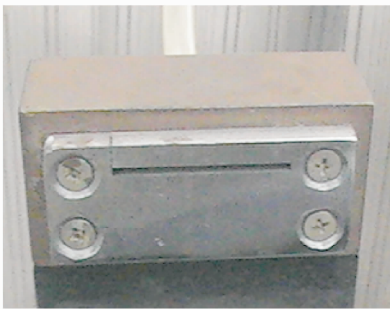
(a) Schematic diagram of the experimental system



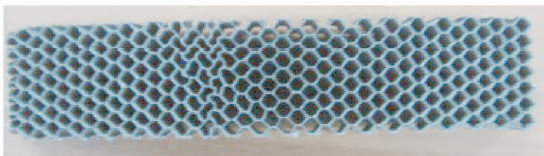
(b) Composition of the experimental system

图 1 实验系统示意图和构成

Fig. 1 Schematic diagram and component of the experiment system



(a) Suction gap



(b) Honeycomb seal at blade side

图 2 吸气嘴和叶片侧边蜂窝密封

Fig. 2 Suction gap and honeycomb seal at blade side

密封结构,对比了两种密封条件下叶片振动主动控制的效果。

1.2 可控流量调节系统设计

应用 LABVIEW 软件设计流量调节系统, LABVIEW^[13-14]具有形象化的前面板界面和流程式的程序界面,还具有数据采集和分析处理等模块,操作简便、稳定,精度高。本程序的前面板界面如图 3

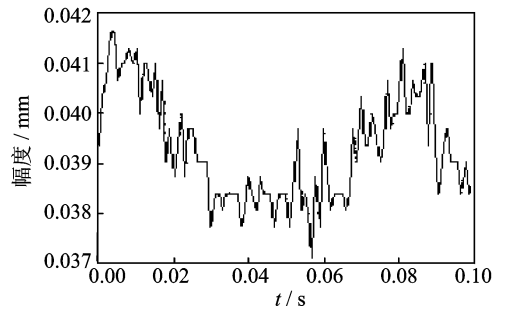


图 3 LABVIEW 程序前面板界面

Fig. 3 Front panel interface of LABVIEW

所示,“Waveform Graph”实时显示叶片振动波形,“当前值”为叶片振动峰峰值,“output variable”为电动调节阀阀门开度。

电涡流位移传感器采集叶片振动信号,经过数据调理板进行信号调理,由 NI 6220 数采卡读取, LABVIEW 程序对数采卡传输的电压信号进行处理计算后,由串口输出到 XSTS 单回路 PID 控制仪表,控制仪表输出 4~20 mA 直流电流信号以控制电动调节阀的开度,从而实现反旋流喷气或吸气流量的实时闭环控制。

文中闭环控制系统的输入为叶片振幅,输出为电动调节阀阀门开度。实验中 LABVIEW 流量调节程序采用分段式控制,基于实际的叶顶吸气实验数据分析,根据运行工况设定了振幅阈值及其对应的阀门开度。实验设定的振幅阈值与阀门开度的对应情况如表 1 所示。

表 1 实验设定的振幅分段情况与阀门开度

Tab. 1 The relationship between valve open degree and amplitude section

振幅分段/ μm	<40	40~80	80~120	>120
阀门开度	0	30%	60%	100%

2 实验结果与分析

实验过程中通过工况调节阀改变叶片振动工况,比较不同工况下主动控制系统作用前后叶片的振动幅值。分别在叶片光滑密封和蜂窝密封条件下进行上述比较与分析。

2.1 光滑密封条件下主动控制系统作用效果

叶片两侧密封为光滑密封时,不同激励工况下主动控制系统的作用效果及吸气前后叶片的振动波形图如图 4~6 所示。

激励工况 1 下,叶片振幅达到 72.4 μm (40~80

μm), 主动控制系统作用后, 电动阀开度自动调节到 30%, 以此开度吸气后振动值降低到了 $46.1 \mu\text{m}$ 。

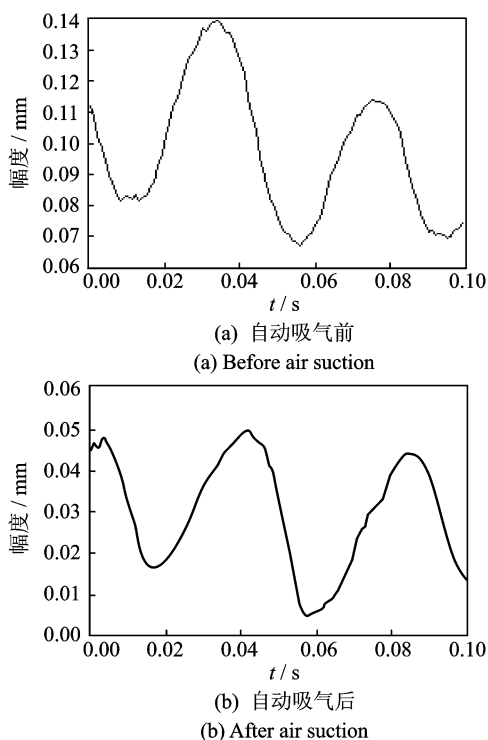


图4 光滑密封条件下叶片激励工况 1

Fig. 4 Blade vibration by exciting condition 1 with smooth seal

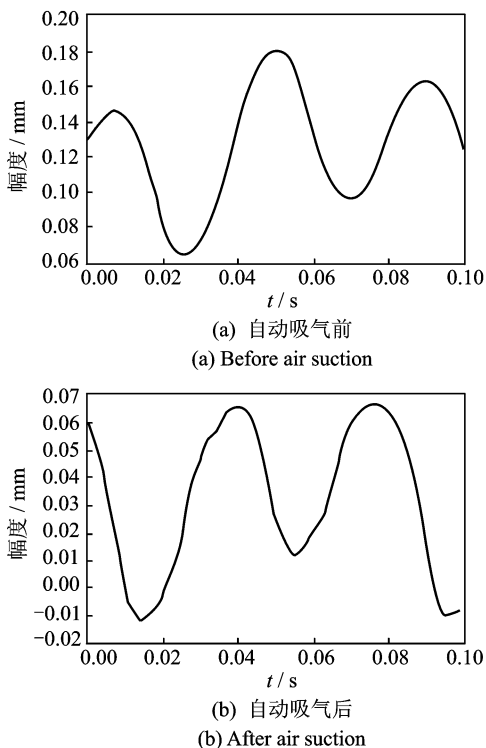


图5 光滑密封条件下叶片激励工况 2

Fig. 5 Blade vibration by exciting condition 2 with smooth seal

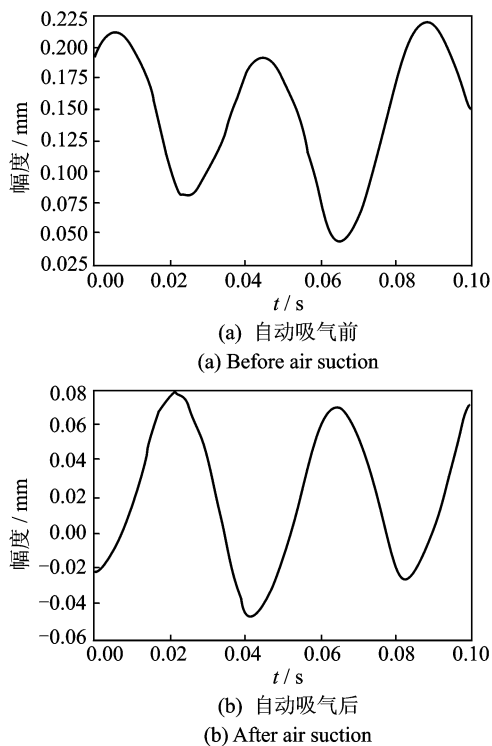


图6 光滑密封条件下叶片激励工况 3

Fig. 6 Blade vibration by exciting condition 3 with smooth seal

激励工况 2 下, 振幅为 $116.5 \mu\text{m}$ ($80 \sim 120 \mu\text{m}$ 之间), 主动控制系统作用后, 电动调节阀开度自动调节为 60%, 振动值降低到 $80.8 \mu\text{m}$ 。

激励工况 3 下, 振幅达到 $178.1 \mu\text{m}$ (超过 $120 \mu\text{m}$), 主动控制系统作用后, 电动调节阀开度自动调节到 100%, 振动值降低到 $127.2 \mu\text{m}$ 。实验数据表明, 光滑密封条件下, 叶顶吸气分段式主动控制减振效果可达到 30% 左右。

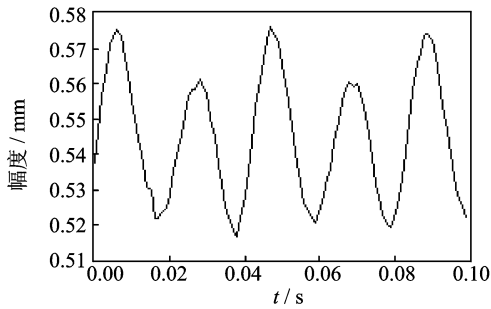
2.2 蜂窝密封条件下主动控制系统作用效果

叶片两侧采用蜂窝密封, 其他实验操作与光滑密封条件下的操作相同。两种密封条件下叶片受到的激励强度对应相同, 蜂窝密封条件下的实验结果如图 7~9 和表 2 所示。

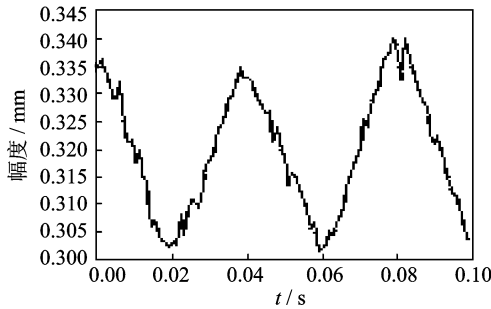
激励工况 1 下, 叶片振幅为 $59.4 \mu\text{m}$ ($40 \sim 80 \mu\text{m}$), 主动控制系统作用后, 电动调节阀开度自动调节到 30%, 振动值降低到 $38.9 \mu\text{m}$ 。

激励工况 2 下, 振幅为 $85.0 \mu\text{m}$ ($80 \sim 120 \mu\text{m}$), 主动控制系统作用后, 电动调节阀开度自动调节到 60%, 振幅降低到 $65.9 \mu\text{m}$ 。

激励工况 3 下, 振幅 $135.3 \mu\text{m}$ (大于 $120 \mu\text{m}$), 主动控制系统作用后, 电动阀开度自动调节到 100%, 振幅降低到 $104.5 \mu\text{m}$ 。蜂窝密封条件下, 减振效果可达到 30% 左右。

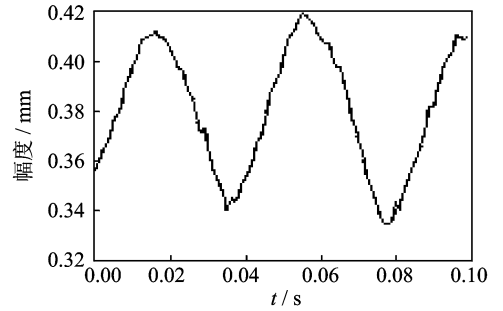


(a) 自动吸气前
(a) Before air suction

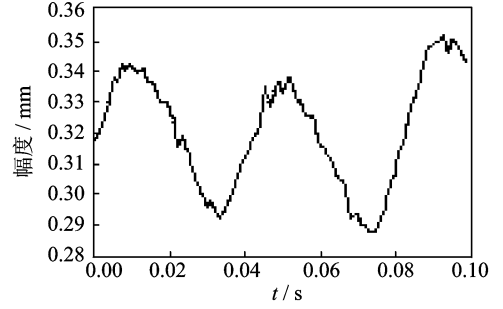


(b) 自动吸气后
(b) After air suction

图 7 蜂窝密封条件下叶片激励工况 1
Fig. 7 Blade vibration by exciting condition 1 with honeycomb seal

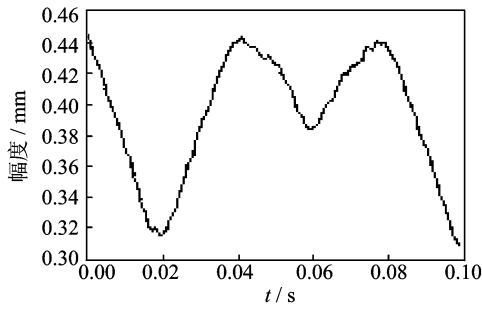


(a) 自动吸气前
(a) Before air suction

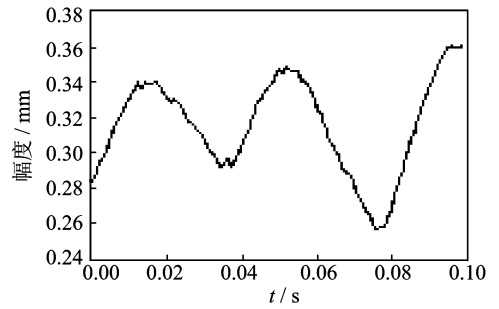


(b) 自动吸气后
(b) After air suction

图 8 蜂窝密封条件下叶片激励工况 2
Fig. 8 Blade vibration by exciting condition 2 with honeycomb seal



(a) 自动吸气前
(a) Before air suction



(b) 自动吸气后
(b) After air suction

图 9 蜂窝密封条件下叶片激励工况 3
Fig. 9 Blade vibration by exciting condition 3 with honeycomb seal

表 2 不同条件的减振效果

Tab. 2 Vibration suppressing effect at different conditions

激励工况	光滑密封	光滑+主动控制		蜂窝密封		蜂窝+主动控制	
	振幅/ μm	振幅/ μm	减振幅度/%	振幅/ μm	减振幅度/%	振幅/ μm	减振幅度/%
工况 1	72.4	46.1	36.3	59.4	18.0	38.9	46.2
工况 2	116.5	80.8	30.6	85.0	27.0	65.9	43.4
工况 3	178.1	127.2	28.6	135.3	24.0	104.5	41.3

2.3 实验结果分析

叶顶抽取气流,主要是通过改善流体特性-叶片转子周向流动模式来减弱叶片振动。在叶顶适当的位置吸气^[10]使得叶顶间隙气流速度和压力减小,气

流动能和压力能就减小,即激励叶片振动的能量就减小,从而导致叶片振幅减小。基于叶顶吸气实验数据,对叶顶吸气采用分段式控制,针对不同的叶片振动幅值抽取适当的气流,达到抑制叶片振动的效果。

实验数据表明,光滑密封条件下,叶顶吸气分段

式主动控制减振效果可达到30%左右。蜂窝密封被动控制的减振效果在20%左右,蜂窝密封被动控制和主动控制系统同时作用时减振效果可超过40%,详见表2。

3 结论

1) 笔者开发的叶片振动主动控制系统能根据运行工况实时调节控制振动的气流流量,并将叶片振动幅值控制在设定的阈值范围内,系统运行可靠,适用性较强。

2) 叶片侧边为光滑密封或蜂窝密封时,叶片振动主动控制系统均有较明显的减振效果,减振幅度在30%左右。

3) 与光滑密封相比,叶片侧边密封采用蜂窝结构时,叶片稳定性更高,蜂窝密封被动控制的减振效果在20%左右。

4) 蜂窝密封与主动控制系统同时应用时,减振效果更佳,减振幅度可超过40%,即被动控制与主动控制结合时有更理想的减振效果。

参 考 文 献

[1] Culley D E, Bright M M. Active flow separation control of a stator vane using embedded injection in a multistage compressor experiment[J]. American Society of Mechanical Engineers Journal of Turbomachinery, 2004, 126(1): 24-34.

[2] Bons J P, Sondergaard R, Rivir R B. The fluid dynamics of LPT blade separation control using pulsed Jets[J]. American Society of Mechanical Engineers Journal of Turbomachinery, 2002, 124(1): 77-85.

[3] Freeman C, Wilson A G, Day I J, et al. Experiments in active control of stall on an aeroengine gas turbine[J]. American Society of Mechanical Engineers Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 637-647.

[4] Lee N K W, Greitzer E M. Effects of endwall suction and blowing on compressor stability enhancement[J]. American Society of Mechanical Engineers Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 133-144.

[5] Muszynska A, Bently D E. Anti-swirl arrangements prevent rotor/seal instability[J]. Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 1989, 111(2): 156-162.

[6] 沈庆根, 李烈荣, 潘永密. 迷宫密封中的气流激振及其反旋流措施[J]. 流体机械, 1994, 22(7): 7-12. Shen Qinggen, Li Lierong, Pan Yongmi. Flow induced vibration and anti-swirl arrangements in labyrinth seal[J]. Fluid Machinery, 1994, 22(7): 7-12. (in Chinese)

[7] 丁磊, 何立东, 李金波. 叶顶吸气效应抑制叶片振动

的研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 121-124.

Ding Lei, He Lidong, Li Jinbo. Research of suction effect on suppressing blade vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 121-124. (in Chinese)

- [8] 闻邦椿, 武新华, 丁千, 等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 309-312.
- [9] 孙永强, 何立东. 叶片闭环可控吸气减振技术实验研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(6): 96-99. Sun Yongqiang, He Lidong. Experimental study of vibration reduction of a blade using closed-loop control air-inhalation technology [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2009, 36(6): 96-99. (in Chinese)
- [10] 李金波, 何立东. 蜂窝密封流场旋涡能量耗散的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 67-71. Li Jinbo, He Lidong. Energy dissipation of vortices in honeycomb seals using numerical simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(32): 67-71. (in Chinese)
- [11] 何立东, 袁新, 尹新. 蜂窝密封减振机理的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 24-27. He Lidong, Yuan Xin, Yin Xin. Experimental investigation on the suppression mechanism for honeycomb seals[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 24-27. (in Chinese)
- [12] 何立东, 张强, 霍耿磊. 蜂窝密封抑制叶尖密封激振的研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(3): 97-100. He Lidong, Zhang Qiang, Huo Genglei. A study of the suppression of blade tip gas excitation in a honeycomb seal[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2009, 36(3): 97-100. (in Chinese)
- [13] 季忠, 陈青, 秦树人. 虚拟式流体参量集成测试系统及其实现[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 410-413. Ji Zhong, Chen Qing, Qin Shuren. Development of virtual integrated measurement system for fluid parameter [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 410-413. (in Chinese)
- [14] 张健滔, 姚志远, 宋小刚, 等. 基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 218-222. Zhang Jiaotao, Yao Zhiyuan, Song Xiaogang, et al. Mechanical characteristics of linear ultrasonic motors based on virtual instrument[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 218-222. (in Chinese)



第一作者简介:何立东,男,1963年2月生,研究员、博士生导师。主要研究方向为旋转机械减振技术。曾发表《叶顶吸气效应抑制叶片振动的研究》(《振动与冲击》2010年第29卷第6期)等论文。
E-mail: he63@263.net

