

文章编号:0253-9721(2007)06-00100-06

基于微型风扇阵列系统的人体降温空调服

曾彦彰¹, 邓中山¹, 刘静^{1,2}

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100080; 2. 清华大学医学院, 北京 100084)

摘要 论证基于微型风扇阵列的人体降温空调服的概念, 并从理论和实验方面对其可行性进行评估。通过数值求解各类典型热环境条件下的三维 Pennes 生物传热方程, 揭示出在皮肤表面引入微型风扇阵列时, 其强化散热作用可显著降低体表的温度水平。同时, 还采用红外成像技术及热电偶测温方式, 对模拟人体的发热块经受风扇阵列强化散热作用前后的降温情况进行实验测定, 进一步证实微型风扇阵列的高效降温特性, 期望引申出新一代可灵活调节的空调服。

关键词 微型风扇阵列系统; 空调服; 热舒适; 红外成像; 生物传热; 体温调节; 功能服

中图分类号: TS941.731 文献标识码: A

Micro-fan-array system enabled air conditioning suit for cooling human body

ZENG Yanzhang¹, DENG Zhongshan¹, LIU Jing^{1,2}

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The concept of the body cooling suit enabled from the micro-fan-array system was interpreted. Theoretical prediction and experimental measurements were performed to demonstrate the feasibility of the new cooling method. Based on Pennes equation, numerical simulation on the three-dimensional heat transfer in human body subject to various typical ambient thermal conditions revealed that, implementation of the micro-fan-array near the skin surface could significantly lower the body surface temperature, owing to its strong capability in heat transfer enhancement. Meanwhile, both infrared thermometer and thermocouple data acquisition system were adopted to measure the micro-fan-array cooling induced temperature decrease on a thermo-man used to simulate the human body. The results further strongly support the high efficiency of the micro-fan-array cooling. This research is expected to open a new strategy for developing air cooling suit aiming at flexibly regulating the heat dissipation states of the body surface under a hot environment.

Key words micro-fan-array system; air conditioning suit; thermal comfort; infrared thermograph; bioheat transfer; body temperature regulation; functional suit

服装的一个基本功能是保暖,而在炎热的夏季或高温工作环境中,人们则希望服装具有防暑降温的功能。实际上,相对于体表保温而言,降温问题更显棘手。人体散热的途径有 4 类:传导、对流、辐射和蒸发,因此,能够改善上述因素的任何一条途径均可能用于开发新的降温空调服。例如,已有的一种专利技术是在管道中充水并引入一定动力使之流动

来对体表进行降温^[1],但这种方法耗能高,衣服重量大,穿着不方便;文献[2]则提出加水雾化后送往体表,利用其蒸发来降低体温,但难以保证舒适性;此外,人们还采用相变材料吸热对人体进行降温,但同样存在上述问题。

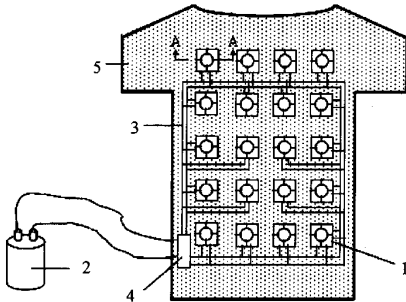
高温环境下,人体皮肤表面若仅靠自然对流和蒸发,则散热效果有限,因此,一种可能的途径是在

收稿日期:2006-09-22 修回日期:2007-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50325622)

作者简介:曾彦彰(1984—),男,硕士生。主要研究方向为微系统技术。刘静,通讯作者,E-mail: jliu@cl.cryo.ac.cn。

衣服内引入风扇来增强换热,这有些类似于计算机芯片冷却。但目前的风扇体积较大,不易封装,且常常需加以特殊设计如设置一定密闭空间,以适应风扇驱动的气流能促进皮肤表面的热量散失,显然,体积较大的风扇会使得由此制成的服装显得笨拙。为实现真正舒适的人体降温空调服,文献[3]曾基于当前微加工技术的发展水平,提出一种基于微型风扇阵列的人体降温空调服,如图1所示,其采用的风扇尺寸较小,易于编织到衣服内,从而可对所触及的皮肤局部进行强化换热,促进该处气体的对流及汗液蒸发;当大量由此集成的风扇阵列工作时,即可完成对身体特定部位皮肤表面的温度进行选择调节,由于这类微型风扇体积小,耗能低,重量轻,人体穿着后无明显不适,衣服的使用与常规情况没有差别,由此可望实现较为舒适的空调衣服。这种空调服的使用对象除高温工作者外,也适合于普通消费者夏天外出时穿着。本文从理论和实验2个角度研究基于微型风扇阵列的空调服的降温情况,以论证其可行性。



注:1—微型风扇阵列;2—微电源;3—电路连线;
4—开关阵列;5—衣服布料。

图1 基于微型风扇阵列的人体降温空调服的结构示意图

Fig.1 Schematic of micro-fan-array based air conditioning suit for cooling human body

1 理论计算

1.1 生物传热模型

人体热状态方程采用生物传热领域内应用最为广泛的 Pennes 方程加以描述,其一般形式为^[4]:

$$\rho c \frac{\partial T(X, t)}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla [T(X, t)] + \omega_b \rho_b c_b [T_a - T(X, t)] + Q_m(X, t) + Q_r(X, t) \quad (1)$$

式中: ρ 、 c 和 k 分别为组织的密度 (kg/m^3)、比热 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$) 和热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$); ρ_b 、 c_b 分别为血液的密度 (kg/m^3) 和比热 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$); ω_b 为血液灌注率 ($\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{mL})$); T_a 为动脉血温度 ($^\circ\text{C}$), 一般被当作常数; T 为组织温度 ($^\circ\text{C}$); Q_m 为组织的代谢产热 (W/m^3); Q_r 为空间加热产生的体积热源强度 (W/m^3); X 包含直角坐标系的3个分量 x, y 和 z 。

皮肤表面的热边界条件由3部分组成: 对流、辐射和蒸发, 可描述为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T_s - T_f) + \sigma \epsilon (T_s^4 - T_f^4) + Q_e \quad (2)$$

式中: h_c 是皮肤表面对流换热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$); T_s 、 T_f 分别是皮肤表面和周围空气的温度 ($^\circ\text{C}$); ϵ 为人体表面黑度; σ 为玻尔兹曼常数; Q_e 为皮肤表面由于水分蒸发而造成的总的蒸发热损失 (W/m^2)。

$$Q_e = Q_{\text{diff}} + Q_{\text{nw}} \quad (3)$$

式中: Q_{diff} 为隐性出汗散热; Q_{nw} 为显性出汗散热。

$$Q_{\text{diff}} = 3.054(0.256 T_s - 3.37 - P_a) \quad (4)$$

式中 P_a 为环境空气中的水蒸气分压力 (Pa)。

$$Q_{\text{nw}} = W_{\text{nw}} 16.7 h_c (P_{\text{sk}}^* - P_a) \quad (5)$$

式中: W_{nw} 是皮肤湿度 (指皮表上含汗液面积在全部皮表面积中所占的份额, 是一个无量纲参数); P_{sk}^* 为皮肤温度下空气中水蒸气的饱和分压力 (Pa); h_c 为对流换热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)。

根据该模型, 如果知道了体内的温度分布和周围环境的参数, 则可以结合边界条件来计算体表的温度分布情况。为求解上述包含复杂边界条件的非线性偏微分问题, 本文采用 Monte Carlo 算法进行计算, 详细步骤参见文献[5]。

首先, 建立一个微型风扇阵列作用模型: 选取人体背部体表尺寸为 $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ 的一块面积及其对应的体内组织作为研究区域, 每个微型风扇尺寸为 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, 设定4个风扇作用在皮肤表面。人体核温度取为 $37 \text{ }^\circ\text{C}$, 体核深度为 4 cm ^[4]。计算区域如图2所示。人体组织的各参数设置取其典型值^[5]: $\rho = \rho_b = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $k = 0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, $c = c_b = 4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $\omega_b = 0.0005 \text{ mL}/(\text{s} \cdot \text{mL})$, $Q_m = 420 \text{ W}/\text{m}^3$ 。

1.2 计算结果

1.2.1 人体处于高温环境下的情况

正常情况下, 人体处于基础代谢状态, 体表无风扇作用, 环境温度取一定的高温条件如 $35 \text{ }^\circ\text{C}$, 计算得出的体表温度分布如图3所示。由图可见, 此时

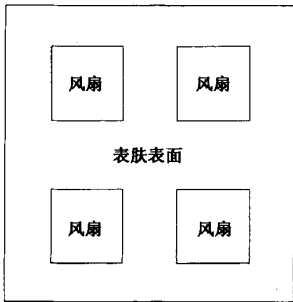


图 2 人体背部体表风扇阵列模型

Fig.2 Model of fan array at the back skin of human body

的体表温度为36℃左右,接近体核温度,在这种情况下,人体会有热的感觉,极易发生中暑,因此需要尽快降温。近年来,由于温室效应加剧,夏季气温处于35℃已为常见,有时无空调环境温度甚至超过40℃。以上所采用的环境温度反映的正是此类情况。实际上,环境温度越高,微风扇阵列式降温方法的意义越明显。

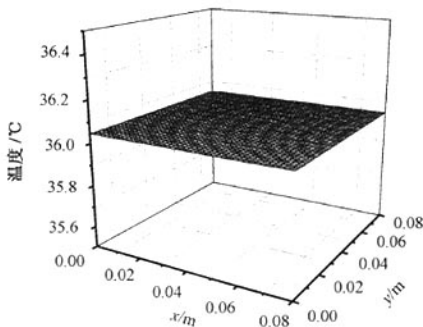


图 3 正常情况下体表温度分布图

Fig.3 Temperature distribution across skin surface under normal condition

1.2.2 体表采用风扇冷却的情况

依据人体不同的出汗状态,皮肤表面的湿度范围可在0~1之间^[4]。本文考虑体表采用风扇阵列作用后,皮肤湿度取其典型值如0.2加以分析。另外,依据皮表不同的风速,其周围的对流换热系数也可处于较宽的数值范围,如5~200 W/(m²·℃)之间。因此在如下计算中,不失一般性,风扇正对区域由于换热增强,其相应的对流换热系数可取为典型值100 W/(m²·℃);作为对比,其他皮表区域的对流换热系数则取为无强化换热情况下的数值20 W/(m²·℃)^[4],环境温度则取得略高于室温的30℃。从式(5)可以看出,人体的蒸发散热项和皮肤湿度密切相关,当风扇作用加大对流换热系数后,就需要考虑皮肤的湿度。此时计算所得的体表温度

分布如图4所示。可看出,在风扇作用下体表的最低温度降到了29℃,相比无风扇时体表温度下降了7℃。研究表明,相比于皮肤干燥(皮肤湿度为0)的情况,皮肤湿度越大,风扇阵列的降温效果越好;而且,环境温度越高,皮肤湿度对风扇阵列的降温效果影响越大,因而解决了通常情况下人体处于汗流浹背状态时热量难以从体表排解的难题。以上结果均为采用微型风扇阵列实现空调降温服提供了理论依据。

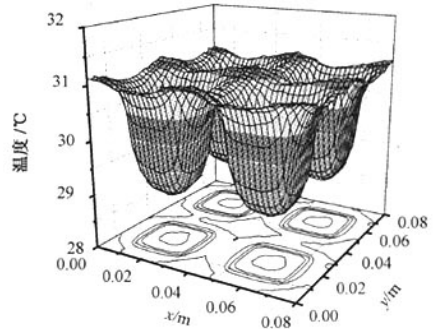


图 4 皮肤湿度为0.2时风扇作用下体表温度分布图

Fig.4 Temperature distribution on skin surface subject to fan cooling (skin humidity 0.2)

1.2.3 人体体表受太阳照射的情况

以上分析均针对室内环境,相比之下,处于太阳照射下的热环境状况要比室内严峻得多,而且空调服的使用者大多数情况下都是在户外工作或运动,这种条件更接近实际。下面计算风扇阵列在阳光照射条件下的降温情况。

阳光照射时,Pennes方程的边界条件中应增加一项太阳辐射项;此时皮肤会有灼热的感觉。根据太阳辐射计算公式有:

$$G_{s,0} = S_0 f \sin\theta \quad (6)$$

式中: S_0 在地球表面取1353 W/m²; f 约为1; θ 为阳光与水平面的夹角,一般情况下 θ 接近90°;参照世界气象组织统计资料,太阳辐射项取为200 W/m²进行讨论比较合适。

计算结果表明:环境温度取35℃,在阳光下无风扇作用时,体表温度可达40.3℃,已明显高于体核温度,在这种情况下人极易中暑,因此,在夏季外出时,必须采取措施降低体表温度。下述算例中,采用风扇冷却后,风扇正对体表区域的对流换热系数取100 W/(m²·℃),其他区域的对流换热系数取20 W/(m²·℃),环境温度取35℃,于是皮肤湿度取0.2时的体表温度分布如图5所示。可见体表最低温度

降到了30℃左右,相比无风扇时有了较大幅度的下降;如果皮肤湿度进一步加大,则降温效果会更好。

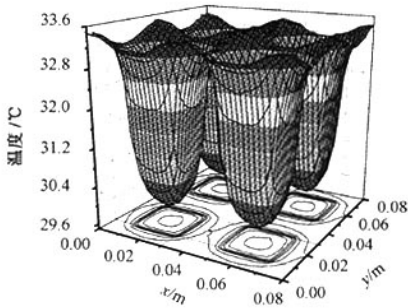


图 5 太阳照射下皮肤湿度 0.2 时风扇作用后体表温度分布图

Fig.5 Temperature distribution across skin surface subject to sun shine and fan cooling (skin humidity 0.2)

总之,以上各种热环境下的计算结果表明,在高温条件下,微型风扇阵列可以有效地降低该区域的体表温度,特别是皮肤有一定湿度时,降温效果更好,可以达到10℃以上。说明基于微型风扇的人体降温空调服的设计思路是可行的,克服了汗液对传热的屏障作用。

2 实验测量

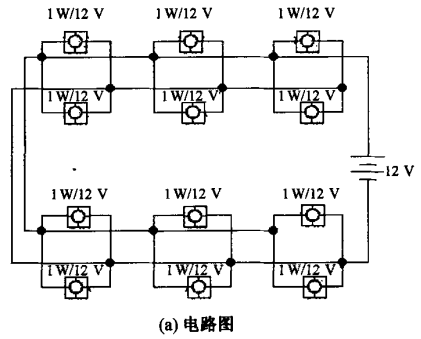
2.1 风扇阵列设计

为实际考察风扇阵列的降温性能,制作了一个微型风扇阵列电路,如图 6 所示。其中,微风扇选用计算机显卡上的散热风扇,虽然该器件并非最终用于实际的空调服上,需进一步优化,但作为初步验证风扇阵列的降温性能是可以的。此电路的规格为:单个风扇的大小 4 cm × 4 cm,相邻风扇间距 3 cm,电源电动势 $\epsilon = 12\text{ V}$,风扇额定电压 12 V,回路中的电流 1 A,每个风扇的功率 1 W,电路总功率 12 W。

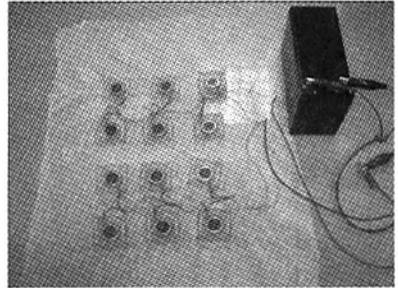
2.2 风扇阵列降温情况的红外成像实验

任何温度在绝对零度以上的物体都能向外发出红外辐射,辐射强度和物体表面的温度有着直接联系。红外成像正是一种通过捕捉物体表面辐射来形成位图的成像技术。在表现形式上,利用红外成像技术拍摄的体表温度分布和前面基于 Monte Carlo 方法计算出的体表温度分布是一致的。

实验中采用盛满温水的热水袋来模拟人体体表,由于热水袋的保温性能良好,可以保证袋内水温接近恒温,而且热水袋表面材料的热性能接近皮肤,



(a) 电路图



(b) 实物图

图 6 微型风扇阵列电路图及实物图

Fig.6 Electric circuit for micro-fan-array (a) and the corresponding prototype (b)

因此模拟体表是可行的。红外成像技术的优点是成像面积大,可以从整体上把握整个表面的温度走向。其次,红外成像拍摄的温度分辨率可以达到 0.01℃,可以很清晰地分辨出热水袋表面温度分布的细微变化。

实验中,首先测试热水袋表面无风扇作用的情况,此时所拍摄到的红外温度分布见图 7,其中热水袋表面最高温度为 42.6℃。

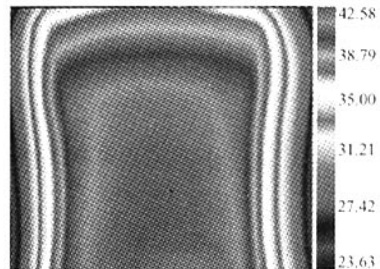


图 7 无风扇时的热水袋红外温度分布图

Fig.7 Infrared temperature mapping across a hot water bag without fan cooling

但若将风扇阵列覆盖到热水袋表面后,则表面温度迅速降低,用红外成像仪拍摄到的热水袋表面温度分布如图 8 所示。分析该图可知,风扇阵列作用后热水袋表面的最高温度为 31℃,比作用前下降

了11℃,说明风扇阵列引起的降温幅度相当显著。当然,人体的传热机制远比热水袋要复杂,但风扇阵列的散热效果同样是很明确的。

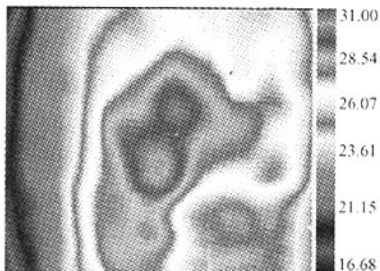


图 8 热水袋表面在风扇作用下的红外温度分布图
Fig.8 Infrared temperature mapping on a hot water bag after fan cooling

实验中若停止风扇阵列的运转,1 min后再拍一幅热水袋表面的红外效果图,可以看出,一旦终止无风扇阵列的强化散热,则热水袋表面的最高温度将迅速攀升,1 min之内即恢复到42℃,接近最初的表面温度;所以,为有效降低加热体表面的温度,采用微型风扇阵列是一条相当有效的技术途径。

2.3 风扇阵列降温情况的热电偶实验

利用红外成像技术虽可测量整个考察区域的温度分布情况,便于从整体上了解热水袋表面温度的变化趋势,但红外热像仪每隔5 min才能扫描一幅,由人工手动控制,不能及时地测出表面温度随时间的动态变化,采用热电偶数据采集仪则能很好地解决以上问题。为此,在热水袋表面选好测温点后,电脑每隔2 s自动记录热电偶所处位置的温度值,便于比较风扇作用前后热水袋表面的温度变化情况。虽然单枚热电偶只能测量单点的温度变化,不宜用于判断表面的整体温度,但实验中可以选取热水袋表面有代表性的若干个点作为测温位置,也可基本解决测量面积过小的问题。图9是实际中选用的热水袋表面的电偶分布示意。这里,5、6、7、8、9号电偶分别用于测量热水袋表面不同位置处的温度变化情况,从而可大致判断整个表面的温度趋势。10号电偶则用于监测环境温度,作为其他热电偶的对照。

实验时,首先关闭风扇,利用数据采集仪记录正常状态下某段时间内热水袋表面的温度数据,然后开启风扇,数据采集仪持续读取温度数据,保证数据的连续性,这样就能记录风扇作用过程中温度的具体变化情况。图10是由上述6个热电偶在数据采集仪中的读数作出的温度时间曲线。从图10可以看出,数据采集仪刚开始记录热电偶读取的温度数

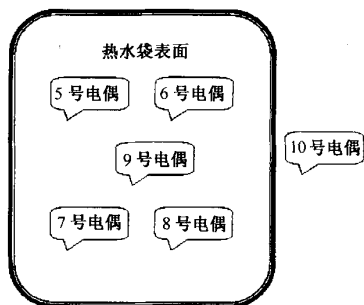


图 9 热水袋表面电偶分布示意图
Fig.9 Schematic for thermocouple distribution across surface of hot water bag

据时,温度比较稳定,直到记录到40 s的时候开启风扇阵列,热水袋表面的5个电偶处的温度几乎同时开始直线下降,最后温度不再下降,热水袋的表面温度达到在风扇阵列作用条件下的稳定状态。5个热电偶的温度时间曲线直观地反映了热水袋表面的降温过程,其降温幅度为4~8℃。

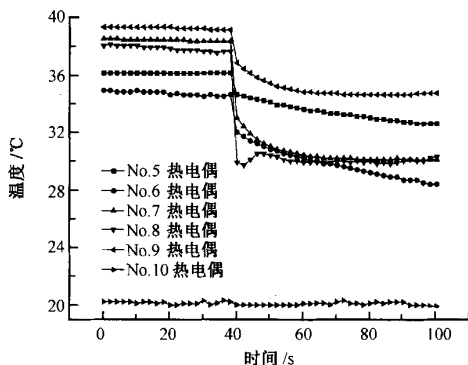


图 10 热电偶测量的热水袋表面温度时间曲线
Fig.10 Thermocouple measured temperature transients across surface of hot water bag

将实验测量结果与理论计算的结论进行对照,二者的降温幅度基本一致。由于皮肤在出汗时的湿度较大,当风扇作用在真正的人体体表,其降温幅度还会更大。

通过以上系列实验可知,利用风扇阵列在体表实施有效降温是完全可行的,这也表明基于微型风扇阵列的人体降温空调服的设计思路具有实际价值。

3 结束语

随着全球气候变暖,炎热环境所造成的中暑问题已成为人类所面对的一大挑战,微型风扇技术的引入将使人体任意部位的强化冷却成为可能,这一

降温技术不仅适用于上衣,也可单独或者同时应用到裤子、内衣、外衣甚至是腰带、帽子、鞋等其他防护用品中,该技术的潜在价值十分明显。

参考文献:

- [1] 马锡洪. 降温升温服装行李座垫: 中国, 86101745A [P]. 1987-09-23.
[2] 于志伟. 冷气服装: 中国, 87101081.X [P]. 1989-

01-18.

- [3] 刘静. 基于纳/微米风扇阵列驱动的人体降温空调服: 中国, 200510102700.2 [P].
[4] 刘静, 王存诚. 生物传热学 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 285-288.
[5] Deng Z S, Liu J. Mathematical modeling on temperature mapping over skin surface and its implementation in disease diagnostics [J]. Computers in Biology and Medicine, 2004, 34: 495-521.

长岭纺电奖励科学家

——中国工程院院士梅自强、姚穆被授予长岭纺电特别贡献奖

在“纺织测量与控制工程技术研究中心”的揭牌仪式上,陕西长岭纺电对多年来帮助和支持长岭纺电事业发展的中国工程院院士梅自强、中国工程院院士姚穆授予“长岭纺电特别贡献奖”。宝鸡市副市长徐强、长岭纺电董事长李强向2位院士颁发了获奖证书和奖杯,表彰他们为长岭纺电的发展、为中国纺织电子仪器的发展做出的特殊贡献。

陕西长岭纺电是我国纺织电子产品研制生产基地,纺织电子产业的龙头企业。在长岭纺电20多年的发展中,梅自强院士、姚穆院士给予了热心的帮助,无私的支持。从20世纪80年代初第一代国产YG131条干均匀度仪研制,到如今条干仪、单纱强力仪、纱线毛羽仪、棉纤维性能测试仪等多项系列产品的研制生产过程中,2位院士提出了许多宝贵意见,指导技术人员解决了不少技术难题,为长岭纺电成为国内行业知名品牌、成为亚洲最大的纺织电子产品研制基地做出了重大贡献,为提高国产纺织电子仪器的技术水平,赶超国际先进水平做出了贡献。