

# 光纤网络的新机遇——时间频率同步和信息感知\*

王波<sup>†</sup> 陈雨锋 王贯

(清华大学精密仪器系 时空信息精密感知技术全国重点实验室 光子测控技术教育部重点实验室 北京 100084)

## New opportunities with fiber optic networks——time-frequency synchronization and sensing

WANG Bo<sup>†</sup> CHEN Yu-Feng WANG Guan

(Key Laboratory of Photonic Control Technology (Ministry of Education), National Key Laboratory of High Precision Space-time Information Sensing Technology, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2023-05-16收到

<sup>†</sup> email: bo.wang@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230706

**摘要** 光纤网络是人类最大的基础设施之一,它支撑着人类社会信息传输与交互的需求。在通信这一本职功能之外,进一步挖掘光纤网络在精密测量、信息感知等领域功能,实现通感算测控一体化,将带来光纤网络的新机遇。文章简要介绍了光纤时间频率同步的基本原理、研究进展,以及在国际大科学工程——平方公里阵列(SKA)等射电阵列上的应用。同时,还介绍了光网络振动信息感知的研究进展,特别是在提升振动定位精度和交通信息感知方面的工作。

**关键词** 光纤网络, 时间频率同步, 振动信息感知, 时移方差

**Abstract** As one of the largest infrastructures of human beings, fiber optic networks support the information transmission and communication requirements of our society. In addition, further exploration of their usage in precision measurement, sensing and other fields for the integration of communication, sensing, computing, measurement and control, will be a new opportunity for fiber optic networks. This article briefly reviews the basic principle and research on fiber-based time-frequency synchronization, as well as applications in international scientific megaprojects such as the square kilometer array and other radio arrays. Current research on vibration sensing using optical networks, especially in improving vibration positioning accuracy and traffic information sensing, will also be described.

**Keywords** fiber optic network, time-frequency synchronization, vibration sensing, time shifting deviation

\* 国家自然科学基金(批准号: 61971259; 62171249)、科技部重点研发计划(批准号: 2021YFA1402102)、清华大学自主科研计划资助项目

## 1 引言

2021年5月18日,联合国大会通过第75/279号决议,宣布2022年为国际玻璃年<sup>[1]</sup>,以展示玻璃在人类社会进步中的作用,并指出玻璃、玻璃相关技术和该领域的进一步创新可以在现代应用中提供各种机会,为可持续发展做出贡献。光纤作为玻璃的一种特殊形态,自20世纪60年代被提出可以用于长距离通信以来<sup>[2]</sup>,已经颠覆性地改变了人类生产生活方式。时至今日,人类铺设的光纤总里程已经达到约40亿公里<sup>[3]</sup>,光纤网络业已成为人类最大的基础设施之一。密布于陆地与海洋的光纤通信网络,就像地球的神经系统,通过信息传输与交互这一光网络的本征功能,支撑着人类社会的高速运行。

在其本征功能之外,人们也一直在探索光纤网络的功能延伸。一个成功的案例就是光纤时间频率传输与同步技术,该技术得益于光纤的低传输损耗和抗电磁干扰等特性,并进一步在时间频率精密计量领域实现了技术指标的全面提升。光纤时频传输与同步稳定度、不确定度、可靠性、覆盖范围的不断提升反过来又推动信息通信向着更高速率、更大容量、更低延迟的方向进步。同时,大规模覆盖的光纤时频同步网络正在支撑高精度地基授时系统<sup>[4]</sup>等国家大科学装置的建设;正在支撑平方公里阵列(Square Kilometer Array, SKA)等国际大科学工程的实施<sup>[5]</sup>,使其大尺度分布式的相位相参测控需求得以实现;正在支撑东数西算国家工程的推进<sup>[6]</sup>,满足其在分布式协同、数据实时一致性方面的严苛要求。

此外,信息感知正在成为光纤网络的另一个功能延伸。科学家们一直努力探索,希望光纤通信网络这一地球的神经系统,也能像人类的神经系统一样,在信息传输本征功能之外,具备信息感知能力。这一功能延伸将为全球地质活动监测、智慧交通、基础设施安全监测等应用领域注入新的活力。近年来,人们先后利用专用光纤进行了油气管线、周界安防、地层结构等方面的信息感知;并进一步利用既有光纤网络基础设施进行地

震、海底地质活动、城市交通振动和交通流量等方面的信息感知方法研究。正如联合国决议中所说,该领域的进一步创新可以在现代应用中提供各种机会。光纤网络正面临新的机遇——通感算测控一体化的光纤网络将有可能再一次对人类社会产生深远影响。

本文简要回顾了光纤时间频率同步(时频同步)技术的发展过程,介绍了光纤时频同步主要技术路线的基本原理。结合清华大学课题组近期的研究工作,详细介绍了光载射频传输这一技术路线,以及光纤时间同步面临的关键技术问题和解决方法。光纤时频同步和光纤信息感知具有共同的技术基础——对光纤传输引入的以相位噪声为主的扰动进行探测。在此基础上对探测到的相位噪声加以补偿和控制,实现了光纤网络的时频同步功能;对探测到的相位噪声加以分析和反演,则实现了光纤网络的信息感知功能。在光网络信息感知方面,本文简要介绍了国内外光网络信息感知方面的研究进展,以及面临的关键技术问题。之后详细介绍了我们课题组在提升光纤振动感知定位精度,进行交通流量监测方面的工作。

## 2 光纤时间频率同步的发展

光纤时频同步最早源于深空网(Deep Space Network, DSN)的观测需求。高精度时频参考的同步和校准是DSN开展航天器空间定位、导航和追踪的关键<sup>[7]</sup>。美国喷气推进实验室(JPL)在1970年代末率先开展基于光纤链路的时间频率信号传输的研究工作。1980年,JPL在1.5 km的多模光纤上实现了氢原子钟信号的分发,证明低损耗、电磁干扰免疫的光纤时频传输可以代替原有的同轴电缆和微波链路传输。1986年,JPL首次在DSN两个站点间布设的7 km单模光纤上实现了氢原子钟信号的传输和环回,并测量了频率传输稳定度,证明光纤短距离无补偿的传输方式不会明显恶化氢钟的性能。由于光纤容易受温度、压力等因素的影响,为了进一步提升传输距离和传输稳定度,JPL在1989年左右开展了主动相位稳定技术的研究<sup>[8]</sup>,开启了基于光载射频传输的光纤

时频同步技术的先河。

20世纪90年代初,随着激光稳频技术的发展以及对高稳定度光学频率参考需求的增加,需要将频率稳定的激光从一个光学平台传输到另一个平台或实验室。保偏单模光纤在当时是一种几乎理想的传输媒介,但是光纤传输过程会恶化激光的相位噪声,无法满足光学频率标准和量子光学等应用对低相位噪声光源的需求。1994年,美国实验天体物理联合研究所(JILA)课题组开展了基于光纤的光学频率传输研究:通过探测激光信号在往返光纤链路传输中引入的相位扰动,利用锁相环技术和声光调制器对单向的链路噪声进行预补偿<sup>[9]</sup>。这一工作为基于光纤的光频传输提供了重要参考。

光纤时频同步发展至今,在国内外大量研究团队的推进下,无论是光载射频传输还是光频传输都有了极大的突破。这两种方式的应用领域有所不同。光载射频传输主要用于射电望远镜阵列<sup>[10]</sup>、微波原子钟的比对和协同<sup>[11、12]</sup>、电力电网<sup>[13]</sup>以及构建大规模光纤时频网。具体的,基于光载射频传输的光纤时频同步已经应用在Atacama大型毫米波天线阵(Atacama Large Millimetre Array, ALMA)<sup>[14]</sup>和英国e-MERLIN<sup>[15]</sup>等射电望远镜阵列中。下一代射电望远镜阵列将成为探索生命起源、银河系演变、宇宙黎明、检验广义相对论等的重要工具,其中最受瞩目的两个望远镜是平方公里阵列射电望远镜(SKA)<sup>[5]</sup>和下一代甚大阵列

(ngVLA)<sup>[16]</sup>。基于光载射频传输的光纤时频同步将是这两个望远镜的重要支撑技术。图1为SKA第一阶段低频阵列授时与同步架构,其中清华大学频率分发方案作为SKA1低频阵列频率分发方案,已被正式写入SKA1建设规划<sup>[17、18]</sup>。

目前最精确的原子钟——光钟的系统不确定度达到 $10^{-18}$ 至 $10^{-19}$ 量级,高传输稳定度的光频传输技术是实现异地光钟比对的关键支撑技术。目前光频传输技术主要用于量子计量领域。欧洲先后利用NEAT-FT项目(基于光通信网的精确时频比对和分发项目)、OFTEN项目(光学频率传输——欧洲网络项目)初步建立了长距离光频比对链路。又利用CLONETS项目(钟网络服务项目)确定了光纤时频分发的具体要求。2019年6月,欧洲正式启动了TiFOON项目(光网络时频传输项目)<sup>[19]</sup>,旨在建设覆盖欧洲大部分重点计量单位且与光通信网络兼容的大规模光纤时频网,并为其他领域,如大地测量学提供重要支撑。我国也已正式启动“高精度地基授时系统”国家大科学装置的建设工作,将利用光纤网络建成国际上规模最大、功能最完善、性能最先进的地基授时系统。

### 3 光纤频率同步技术

光纤频率同步技术方案众多,按照补偿方式,有主动补偿和被动补偿方式;按照传输信号性质,有光载射频信号、光频信号和光频梳信号传输。不论是何种方案,频率同步的核心点都是补偿光纤链路引入的相位扰动,实现远端复现信号与本地端参考信号的相位一致性(相位保持一致或存在固定的相位差)。

如图2所示,发射端(TX)的频率信号经过光纤链路传输后,受环境因素影响引入相位扰动 $\Delta\phi(t)$ ,导致接收端(RX)复现频率相位稳定度出现恶化。对相位扰动项 $\Delta\phi(t)$ 的探测一般是通过

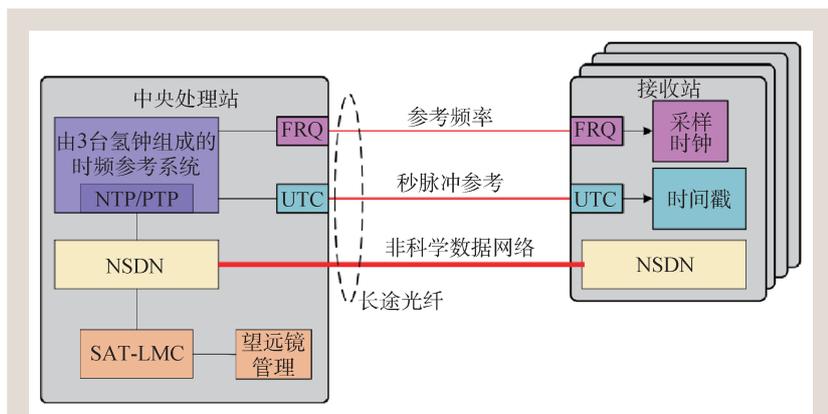


图1 SKA第一阶段低频阵列授时与同步架构(FRQ:频率分发子系统,UTC:时标产生和分发子系统,NTP/PTP:网络时间协议/精密时间协议,NSDN:非科学数据网络(用于监测和控制),SAT-LMC:同步与授时监测控制系统)

往返传输后的频率信号与其参考源进行比对后得到。对相位扰动项  $\Delta\varphi(t)$  的主动补偿可以经由两种途径，其数学表达式分别为

$$\Delta\varphi(t) = \omega_0 \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi(t) = \int \Delta\omega(t) \cdot dt. \quad (2)$$

(1)式的补偿方式表示：通过稳定传输链路的时延，来稳定复现频率信号，在这一过程中并不对传输频率信号进行调整。传输时延的控制是通过改变光纤的长度来实现对链路相位扰动的补偿：利用压电陶瓷补偿链路相位扰动的快变部分，利用温控光纤补偿其慢变部分。该方法主要用于光载射频和光频梳信号的频率同步<sup>[20, 21]</sup>，具有同步稳定度高且可对同一光纤的多路信号同时进行补偿的优点。例如，英国国家物理实验室(NPL)基于该方法实现了光频梳信号的传递<sup>[20]</sup>。法国巴黎天文台基于该方法在 86 km 光纤链路上实现了高精度的频率同步<sup>[21]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所基于该方法在 50 km 光纤链路上实现了时频信号的综合分发<sup>[22]</sup>。重庆光电技术研究所基于该方法实现了宽频带微波频率信号的分发<sup>[23]</sup>。

(2)式的补偿方式表示：对传输频率按照  $\Delta\varphi(t) = \int \Delta\omega(t) \cdot dt$  实时预调整，使其补偿光纤传输引入的相位扰动。对于光学频率传输， $\int \Delta\omega(t) \cdot dt$  项的预调整通常由反馈控制发射端声光调制器来实现。该方法能够实现  $10^{-16}/s$  量级的频率传输稳定度，解决了计量领域异地光钟比对需求，推动了下一代基于光学频率跃迁的“秒”定义变革。超窄线宽激光器的相干长度可达  $2 \times 10^5$  km 以上，且传输过程中受色散影响程度低，容易实现长距离的频率同步。德国联邦物理技术研究院(PTB)和马克斯·普朗克量子光学研究所(MPQ)<sup>[24]</sup>，法国巴黎天文台<sup>[25]</sup>、美国国家标准与技术研究院(NIST)<sup>[26]</sup>、中国科学院国家授时中心<sup>[27]</sup>、中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[28]</sup>、华东师范大学<sup>[29]</sup>等单位在光频传递方面均开展了深入研究。

对于光载射频传输， $\int \Delta\omega(t) \cdot dt$  项的预调整通常由反馈控制发射端的压控晶振来实现。该方法补偿范围大、系统简单、成本低、频率同步



图2 光纤频率传输示意图

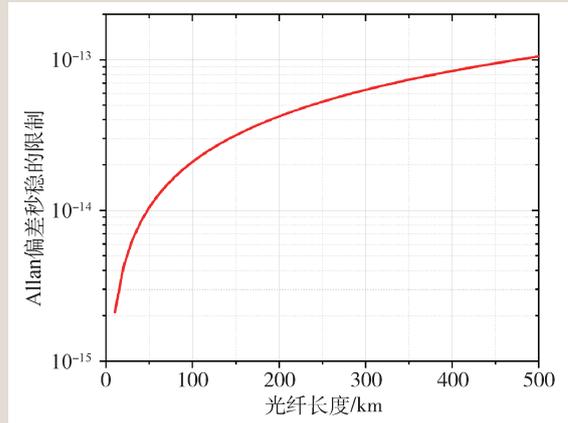


图3 不同光纤长度下色散对频率传输秒稳的限制

稳定度较高，且能长期连续稳定运行。对于光频梳信号传输， $\int \Delta\omega(t) \cdot dt$  项的预调整通常由反馈控制发射端光频梳的重复频率来实现。光频梳信号传输可构建射频信号和光频信号“桥梁”，具有稳定度高、可产生电子学设备能直接使用的射频信号等优点。日本信息与通信研究所(NICT)<sup>[30]</sup>、波兰 AGH 大学<sup>[31]</sup>、澳大利亚国际计量研究院<sup>[10]</sup>、清华大学<sup>[32, 33]</sup>、上海交通大学<sup>[34]</sup>、北京邮电大学<sup>[35]</sup>等单位在基于光载射频传输的光纤频率同步方面均开展了深入研究。北京大学在光频梳传递方面提出了多种补偿方式<sup>[36, 37]</sup>。

被动补偿方法不需要进行主动相位控制，基本原理是用与频率成特定比例关系的信号构建相位共轭关系，从而自动消除链路引入的相位扰动，具有原理简单、补偿范围大等优点。但该方法由于缺少了相位探测补偿的积分过程，对于链路的快速扰动抵抗能力差。清华大学<sup>[38]</sup>、上海交通大学<sup>[39]</sup>、北京邮电大学<sup>[40]</sup>、南京航空航天大学<sup>[41]</sup>等单位在基于被动补偿的光载射频传输方面开展了一系列研究，提出了不同比例频率信号的被动补偿方式。

目前,在射电天文观测<sup>[14-17]</sup>、分布式授时网络<sup>[11, 12]</sup>等应用中,更多采用基于主动相位补偿的光载射频传输方法。不过该方法在长距离应用中受色散和非理想散射(以背向瑞利散射为主)的影响,导致信号的功率和信噪比有较大恶化,从而限制传输稳定度。图3是光载射频传输系统受G652.D型光纤色散影响,在不同传输距离下的秒稳定度(秒稳)理论极限(载波激光器是线宽为3 MHz的分布式反馈激光器)<sup>[33]</sup>。可以看到,在500 km光纤频率传输中,受色散影响,频率传输秒稳被限制在 $10^{-13}$ 的量级,而该稳定度无法支撑

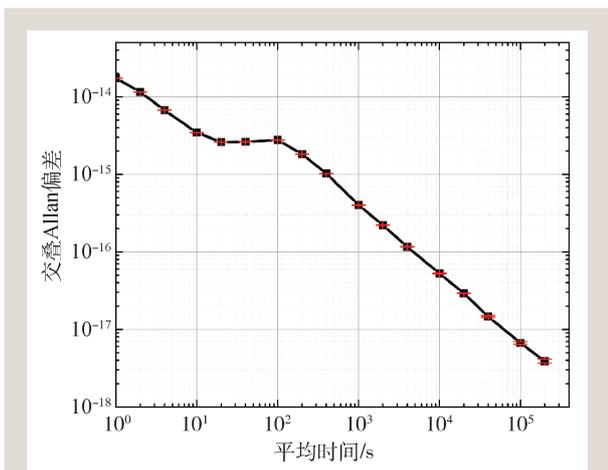


图4 500 km 光纤频率同步稳定度



图5 清华大学课题组研发的SKA 光纤频率同步设备(左上图),应用于平方公里阵列射电望远镜(下图)<sup>[42]</sup>和英国e-MERLIN 望远镜阵列(右上图)<sup>[43]</sup>。其中,右上图中的英文是e-MERLIN 望远镜阵列各望远镜所在的地名或望远镜名称

目前高性能氢钟的频率传输需求。

为了补偿光纤链路色散,抑制背向瑞利散射,同时针对实际链路中广泛存在的光放大节点非对称放大的需求,清华大学课题组提出了一种啁啾光纤布拉格光栅增强的双向光放大方案,利用啁啾光纤布拉格光栅进行色散补偿<sup>[33]</sup>。在由50 km—100 km—150 km—100 km—100 km 共五段光纤组成的500 km 光纤链路上开展了将近14天的频率传输稳定度测试。测试结果如图4所示,实现了秒稳 $1.7 \times 10^{-14}$ ,天稳 $6.7 \times 10^{-18}$ 的高稳定度频率同步,展示了系统在长距离多节点非对称放大光纤链路的良好适用性。

在应用推进方面,我们研究组自2013年就加入国际大科学工程SKA的信号与数据传输工作包联盟。2015—2017年间,多次赴南非SKA站址和SKA天文台所在地——英国Jodrell Bank天文台开展实地链路频率同步和系统兼容性测试<sup>[42]</sup>。所提出的频率同步方案在2017年被选定为SKA低频阵列最终频率同步方案。目前SKA已进入一期建设阶段,我们课题组所研发的光纤频率分发设备将部署在SKA 澳大利亚站址。此外,研发设备还被英国曼彻斯特大学采购,用于英国e-MERLIN射电望远镜阵列授时与同步系统的升级改造,实现Jodrell Bank天文台至Knockin望远镜站点274 km 光纤链路的频率同步,如图5所示<sup>[43]</sup>。

#### 4 光纤时间同步技术

对于异地时间同步,两地时钟存在钟差 $\Delta t$ ,时间同步目的就是测出这一钟差。但由于光速的有限性,光纤链路的单向传输时延 $\tau_p$ 也需要考虑。因此实现光纤时间同步,往往需要明确钟差 $\Delta t$ 和单向时延 $\tau_p$ 两个未知量。为了解出这两个未知量,双向时间比对法利用两地时间戳数据的交互建立两个方程,从而在钟端计算得到钟差 $\Delta t$ 和光纤链路单向时延 $\tau_p$ <sup>[13, 44]</sup>。该方法是目前应用最为广泛的一种光纤时间同步方法,但由于必须借助数据层交互才能实现时间同步,系统复杂性高,同步精度受编解码过程限制,且难以实现中间点下载,系统的拓扑性受限。另一种光纤时间同步方式采

用环回法<sup>[32, 45]</sup>, 主钟端在同步预探测过程中得到光纤链路往返时延 $2\tau_p$ , 从而对链路时延补偿, 并进一步得到两地钟差 $\Delta t$ 。该方法可实现中间点下载, 但主钟端结构复杂, 一点对多点的同步受限。

影响光纤时间同步精度的限制因素主要包括上下行光纤链路的非互易性以及时间间隔的测量精度等。大量的研究工作都集中在解决上述限制因素, 具体包括: 对光纤色散引起的不同波长传输时延差进行标校或消除; 使用双混频时差法和双光梳异步采样等方法提升时间间隔的测量精度。但是, 是否可以通过减少被测量, 例如光纤单向传输时延 $\tau_p$ , 来进一步优化时间同步系统, 却很少被考虑。

基于此, 清华大学课题组提出了一种时间反转的光纤时间同步方法<sup>[46]</sup>, 原理如图6所示。主钟端时间为 $t_M$ , 从钟端与主钟端存在钟差 $\Delta t$ 。在同步请求过程中, 从钟端向主钟端发送时间信号, 主钟端通过比对可测得两地钟差和单向时延的和值,  $\Delta t + \tau_p$ 。利用该测量值对主钟的时间 $t_M$ 进行时间反转, 即 $t_M - (\Delta t + \tau_p)$ , 并传回从钟端。反转的链路时延 $\tau_p$ 在回传的过程中可以自动消除。最终从钟端无需计算链路时延 $\tau_p$ 就能测得钟差 $\Delta t$ 。在实际应用中, 需引入时间常数确保延迟量均为正。基于时间反转的光纤时间同步方法可以避免数据层的引入, 降低系统复杂度, 且过程简单, 用户端按需同步, 因此可实现一点对多点的时间同步。由于链路中传输的是底层物理信号, 可实现中间点下载。

研究人员在230 km的光纤链路上开展了时间同步验证和中间点下载功能的演示。结果如图7所示, 在平均时间1000 s时, 主从端时间同步的时间偏差结果(TDEV)为2 ps, 中间点下载的TDEV为3 ps。

## 5 光网络信息感知技术

基于光网络的信息感知和光纤时频同步具有共同的技术基础。区别于光纤时频同步对链路扰动的探测与抑制, 光网络信息感知选择将链路扰动作为信息来源, 利用光纤网络本身对各种扰动

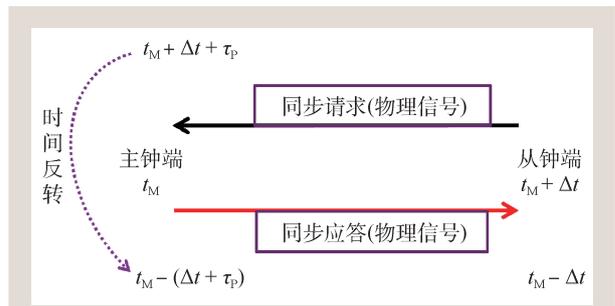


图6 基于时间反转的光纤时间同步原理示意图

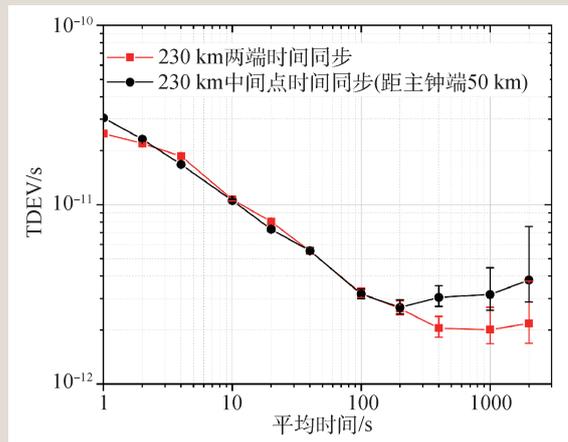


图7 基于时间反转的光纤时间同步方法在230 km光纤的时间同步性能

的敏感响应来实现网络范围内振动等事件的感知和反演。

早在20世纪70年代, 短光纤已经作为内窥镜的重要组成部分被广泛应用于医疗和工业领域。随着激光技术的进步和低损耗光纤的使用, 一种以光纤本身作为传感媒介的传感架构被迅速开发出来, 利用光纤波导直接与被测量相互作用实现被测量与探测光之间的信息转化。在这种架构中, 得益于光纤对应变的灵敏性和抗电磁干扰等优点, 一个简单的前向干涉仪结构就能实现对应变、角速度、温度等参量的测量<sup>[47]</sup>。

然而, 前向干涉式的结构很快就遇到了技术瓶颈: 干涉测量得到的是光纤链路上各点位测量结果的总和, 如果不进行特殊处理会出现交叉感知情况。因此, 只能通过在特殊点位对光纤做缠绕、增敏等处理, 使其成为点式传感器或点式传感阵列, 比如光纤水听器、压力传感器等。这种传感阵列在本质上依然需要在既有光网络之外

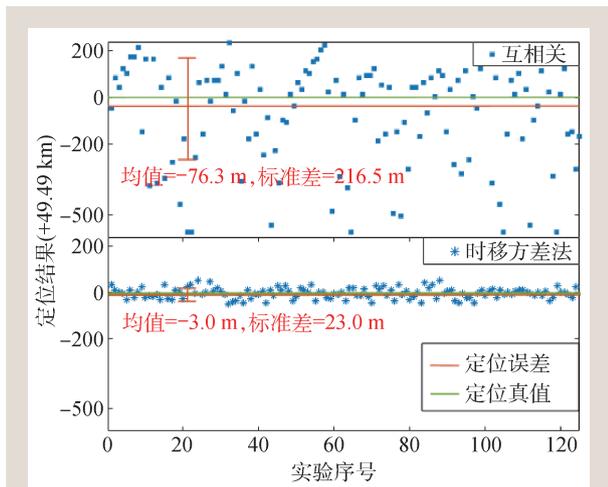


图8 针对发生在49.49 km处的振动事件,使用互相关方法和时移方差方法得到的振动定位结果

专门布设传感器。如何精确地识别干涉测量中每个点位的信息,精准地定位待测事件,是实现既有光网络信息感知功能的一大难题。

一种解决思路是利用光时域反射计的原理,通过探测后向散射光返回测量端的时间来确定扰动事件的位置。以分布式声传感为例,通过向待测光纤中发射周期性光脉冲,接收光脉冲的后向瑞利散射光,从而感知光纤不同位置的应力变化。该技术已经被广泛应用在百公里内的光纤信息感知中,针对不同的应用场景,可以开发相应振动事件的感知功能,在交通监测、地质结构反演、地震监测等领域产出了丰富的研究成果。美国NEC实验室研究团队在55 km的光缆链路上实现了对道路状况、车辆速度等交通信息的感知,并同时实现36.8 Tb/s的光通信数据传输<sup>[48]</sup>;美国斯坦福大学课题组通过监测约10 km通信光缆上的振动,反演出新冠疫情期间光缆沿线道路上通勤车辆的减少、医院附近车辆反而变多的现象<sup>[49]</sup>。德国亥姆霍兹波茨坦中心暨德国地学中心(GFZ)研究组利用冰岛雷克雅内斯半岛上15 km长的通信光缆,探测到光缆沿线的断层和火山岩脉等地质信息<sup>[50]</sup>;加州大学伯克利分校的课题组利用一段20 km长通信光缆的4天维护期,实现了对海浪潮汐等现象的记录,以及对海底断层结构的反演<sup>[51]</sup>。法国国家科学研究中心(CNRS)研究组利用41.5 km通信海缆对海洋微震进行监测和研

究<sup>[52]</sup>;加州理工学院地震实验室利用近海的40 km光缆,实现了对位于另一半球8.2级地震的波形记录<sup>[53]</sup>。

此外,在更长距离的光纤信息感知方面,前向干涉式的光纤传感结构也有新的进展。2018年英国国家物理实验室(NPL)课题组率先在《科学》上发表相关成果,利用长达500 km的通信光缆监测海底地震信息,并提出了利用跨洋光缆对海底地震进行监测和定位的构想<sup>[54]</sup>;2021年,加州理工学院课题组直接从10000 km海底通信光缆的通信光偏振变化中提取地震波形以及海洋微震信息,研究结果也发表在《科学》上<sup>[55]</sup>;2022年,英国NPL课题组的研究工作再次发表在《科学》上,利用海底光缆的中继结构,将5800 km光缆等效为长度45—90 km的多段传感单元,从而实现分布式地震和海洋信息监测<sup>[56]</sup>。基于长距离光纤的振动监测工作多次发表在《科学》上,表明该方向的重要意义和光明的研究前景,并且反映出更长的传感距离才能更好地推动光纤网络信息感知的实现。

然而,前向干涉式的光纤传感所面临的技术难题依然存在。上述几项重要工作都巧妙地避开了陆地上复杂的振动环境,着眼于安静的、干扰源较为单一的海底环境,采用的振动定位技术也仅能达到千米量级定位精度。对于海底地震动辄几十千米的影响范围来说,这种定位精度已经足够。但是,陆地上尤其是城市中高密度、多来源的振动环境,对光网络信息感知提出了更高的振动定位精度需求。

清华大学课题组利用在时频同步研究中积累的对链路扰动的探测抑制经验,发现限制前向干涉式光纤传感定位精度的主要问题:传统基于互相关的振动定位方法在对非平稳振动信号定位时,会引入显著的定位误差。究其根源,互相关是通过扫描两信号相角,寻找两信号的内积最大值来判断振动位置。而针对非平稳振动信号,在扫描相角时,信号本身的有效能量也在变化,导致内积不仅受到相角影响,还会受信号有效能量波动的影响,从而产生定位误差<sup>[57, 58]</sup>。针对这一问题,研究人员提出了一种时移方差定位方法(TSDEV),

在扫描两信号相位时间差时，采用两信号差值的标准差来判断振动位置：

$$TSDEV(\tau) = \sigma [x_1(t) - x_2(t + \tau)], \quad (3)$$

这里， $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 是两路振动信号，并满足关系： $x_2(t) = x_1(t - \tau_0)$ 。其中， $\tau_0$ 代表振动位置对应的两信号真实相位时间差， $\tau$ 是被扫描的两信号间相位时间差， $\sigma[\ ]$ 代表对不同时移下两路信号的差值做标准差。振动定位实际上就是通过扫描 $\tau$ ，对 $\tau_0$ 精确估计的过程。

不难看出，时移方差方法定位过程中，只有当两信号间相位时间差等于真实相差时( $\tau = \tau_0$ )，两信号完全相等、时移方差结果为0；当两信号间相位时间差为任意其他错误相差值时，由于标准差的性质，时移方差结果必然大于0。该定位过程不会受到信号有效能量波动的影响，因此可以实现对非平稳振动信号的高精度定位。

研究人员首先在实验室 60 km 光纤链路上，利用互相关定位方法和时移方差定位方法，分别对 10—30 Hz 的宽频带振动信号进行定位比较。结果如图 8 所示，对于发生在 49.49 km 处的振动事件，互相关方法的定位误差为  $-76.3 \pm 216.5$  m，时移方差方法的定位误差为  $-3.0 \pm 23.0$  m。可以看到，互相关方法会产生百米量级的随机定位误差，导致前向干涉型光纤传感无法在振动密集的城市环境应用。而时移方差方法定位精度优于互相关方法约一个数量级，可对城市交通等振动事件进行定位和区分。

在此基础上，研究人员在北京环路上进行实地实验，利用时移方差方法增强的前向干涉式光纤传感系统，在图 9 所示的通信光缆链路上定位到一处强振动交通节点<sup>[59]</sup>。通过对车辆载荷模型的分析，研究人员发现，车辆载重与振动频率存在一定关系。因此可以利用交通振动峰值频率，划分出分别对应大货车和小客车的两个振动频段，并根据振动波能量，实现大货车流量和小客车流量的分别监测。

如图 10(a)所示，沿线光缆感知到的小客车流量信息与高德导航提供的该点位交通流量高度吻合，15 天平均流量的相关系数达到 0.96，验证了光纤交通振动感知方法的有效性。然而，在对大货车流量进行监测对比时，两种方法给出了不同的结果。如图 10(b)所示，高德导航给出的大货车流量波动不明显，并且远小于实地观测情况；而光纤振动感知方法测得的大货车流量峰值在每日凌晨 2—3 点出现，并且在 11 月 11 日至 11 月 18 日间流量高峰远高于平时。这是因为高德导航通过统计学方法获取交通流量信息，存在用户偏差。对于路面用户占比很小的大货车，统计数据难

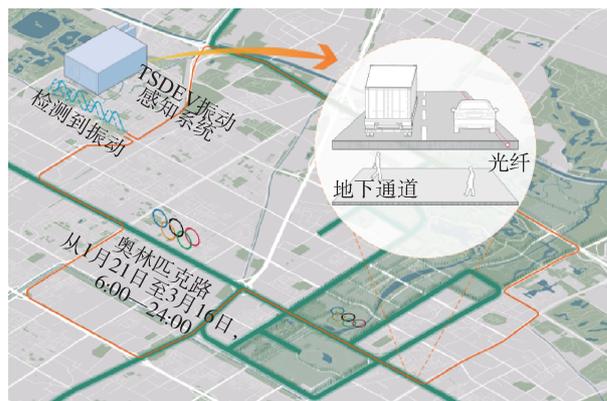


图 9 光纤交通振动感知系统示意图。待测光纤分布在北京环路上，环绕鸟巢等奥运场馆；在某交通节点处，光缆穿过一处地下通道，对交通振动感知更为敏感<sup>[59]</sup>

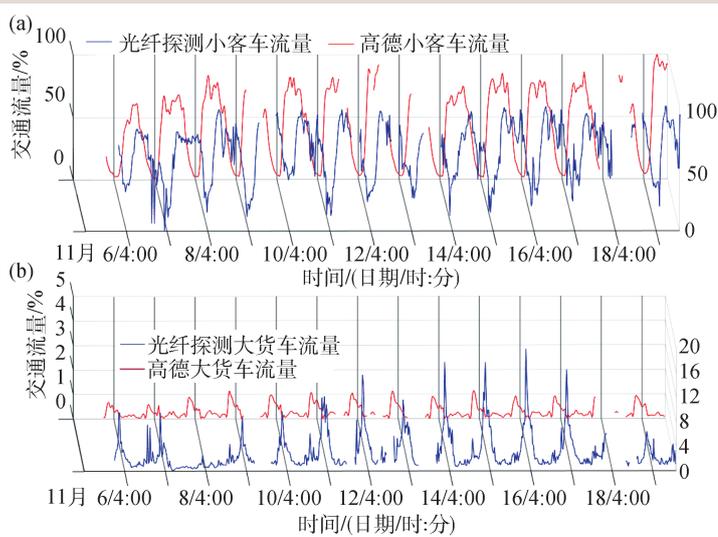


图 10 沿线光缆振动探测和高德导航给出的小客车(a)和大货车(b)流量对比。红线为高德车流量数据，蓝线为光纤感知的车流量信息

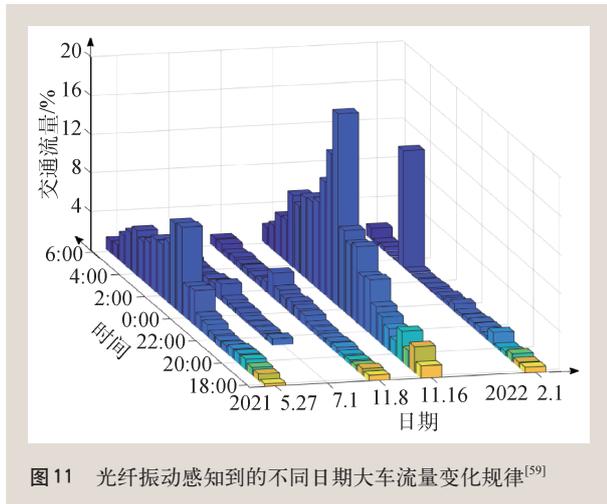


图11 光纤振动感知到的不同日期大车流量变化规律<sup>[59]</sup>

以真实反映其流量信息。利用光纤振动感知方法对该路段进行长期监测，研究人员还观测到夜间大车流量在不同日期的有趣现象。如图11所示，选取2021年5月27日的大货车流量为参考，夜间大车流量在晚上23点后开始攀升，在凌晨达到峰值<sup>[59]</sup>；在7月1日和11月8日的国家重大活动期间，必要的交通管制使大货车流量峰值降为参考日的0.2—0.3倍；在双十一网络购物节期间，11月16日的大货车流量峰值可以达到参考日的2倍以上；在2022年除夕夜，正值北京冬奥会开幕前

## 参考文献

- [1] <https://www.iyog2022.org/>
- [2] Kao K C, Hockham G A. Proc. Inst. Elect. Eng., 1966, 113: 1151
- [3] <https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/case-studies/2018/fibre-optic-cable-study/>
- [4] [http://www.xab.cas.cn/tpxw/201810/t20181024\\_5149561.html](http://www.xab.cas.cn/tpxw/201810/t20181024_5149561.html)
- [5] Grainge K *et al.* Astron. Rep., 2017, 61: 288
- [6] <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztlz/dsxs/>
- [7] Calhoun M, Huang S, Tjoelker R L. Proc. IEEE, 2007, 95: 1931
- [8] Primas L, Logan R T, Lutes G F. Applications of ultra-stable fiber optic distribution systems. 1989, DOI: 10.1109/FREQ. 1989. 68866
- [9] Ma L S *et al.* Opt. Lett., 1994, 19: 1777
- [10] He Y B *et al.* Optica, 2018, 5: 138
- [11] Guo Y C *et al.* Metrologia, 2018, 55: 631
- [12] Guo Y C *et al.* Metrologia, 2019, 56: 045003
- [13] Gutierrez-Rivas J L *et al.* IEEE Trans. Ind. Informat., 2021, 17: 7316
- [14] Shillue B *et al.* Proc. SPIE, 2012, 8452: 845216
- [15] Garrington S T *et al.* Proc. SPIE, 2004, 5489: 332
- [16] Selina R J *et al.* Proc. SPIE, 2018, 10700: 107001O
- [17] Wang B *et al.* Sci. Rep., 2015, 5: 13851
- [18] <https://skao.canto.global/s/M8159?viewIndex=0>
- [19] <http://empir.npl.co.uk/tifoon/>
- [20] Marra G *et al.* Opt. Express, 2012, 20: 1775
- [21] Lopez O *et al.* Appl. Phys. B, 2010, 98: 723
- [22] Chen W *et al.* IEEE Photon. J., 2015, 7: 1
- [23] Zhang H *et al.* J. Light. Technol., 2020, 38: 1688
- [24] Droste S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 110801
- [25] Lisdat C *et al.* Nature Commun., 2016, 7: 12443
- [26] Nakamura T *et al.* Science, 2020, 368: 889
- [27] Zang Q *et al.* Infrared Phys. Technol., 2023, 128: 104511
- [28] Liu L *et al.* Appl. Opt., 2023, 62: 683
- [29] Ma C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2015, 107: 261109
- [30] Fujieda M *et al.* IEEE Trans. Ultrason. Ferr. Freq. Contr., 2010, 86: 093111
- [31] Przemysław K *et al.* IEEE Trans. Ultrason. Ferr. Freq. Contr., 2016, 63: 993
- [32] Wang B *et al.* Sci. Rep., 2012, 2: 556

夕，大货车运仅在凌晨的某半个小时内集中出现。

时移方差方法初步解决了前向干涉式光纤传感对振动定位的难题，在北京市区的交通信息感知演示进一步验证了光纤网络对城市交通信息的感知能力，为更大尺度的光网络信息感知提供了支撑。

## 6 总结与展望

光纤和光纤网络在过去的半个世纪深刻影响了世界，改变了人类的信息传播交互方式。在信息通信之外，利用既有光纤网络实现大范围高精度时间频率同步、信息感知、分布式计算、分布式测控，从而实现通感算测控一体化的光纤网络，将有望在全球尺度，以计量级精度进行天文、地学、气候等领域的观测研究，也有望以更高分辨率、更快响应支撑智慧城市的建设。这一光纤网络的新机遇将有可能再次对人类社会产生深远影响。

**致谢** 感谢研究生王芳敏、戴鸿飞、庞众望、李汶林、李春怡的辛勤工作。感谢王力军教授的关怀和帮助。

- [33] Chen Y F *et al.* IEEE Trans. Instrum Meas., 2022, 71: 5503207
- [34] Li Q *et al.* Opt. Express, 2022, 30: 18402
- [35] Liu C X *et al.* IEEE Photon. J., 2021, 13: 7100108
- [36] Hou D *et al.* Opt. Express, 2011, 19: 506
- [37] Zhang S *et al.* Opt. Lett., 2015, 40: 37
- [38] Bai Y *et al.* Chin. Opt. Lett., 2015, 13: 061201
- [39] Shi P Y *et al.* Chin. Opt. Lett., 2020, 18: 020603
- [40] Liu C X *et al.* IEEE Access, 2019, 7: 97487
- [41] Pan S L *et al.* Photonic Netw. Commun., 2016, 31: 327
- [42] <https://www.skao.int/>
- [43] <https://www.e-merlin.ac.uk/>
- [44] Sliwczynski L *et al.* Metrologia, 2019, 56: 015006
- [45] Zuo F X *et al.* J. Light. Technol., 2021, 39: 2015
- [46] Chen Y F *et al.* 2023, arXiv: 2304.11083 [eess.SP]
- [47] Grattan K T V, Meggitt B T. Optical Fiber Sensor Technology. London: Chapman & Hall, 1995
- [48] Huang M F *et al.* J. Lightwave Technol., 2020, 38(1): 75
- [49] Lindsey N J *et al.* Geophys. Res. Lett., 2020, 47(16): e2020GL089931
- [50] Jousset P *et al.* Nat. Commun., 2018, 9(1): 2509
- [51] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Science, 2019, 366: 1103
- [52] Sladen A *et al.* Nat. Commun., 2019, 10(1): 5777
- [53] Williams E F *et al.* Nat. Commun., 2019, 10(1): 5778
- [54] Marra G *et al.* Science, 2018, 361(6401): 486
- [55] Zhan Z W *et al.* Science, 2021, 371(6532): 931
- [56] Marra G *et al.* Science, 2022, 376(6401): 874
- [57] Wang G *et al.* Photonics Res., 2022, 10(2): 433
- [58] Pang Z W *et al.* J. Lightwave Technol., 2022, 40(9): 3003
- [59] Wang G *et al.* J. Lightwave Technol., 2023, 41(1): 347

## 悟理小言

# 知识经济的典范：BlueFors 干式稀释制冷机

2005年，芬兰 Helsinki University of Technology (现名 Aalto 大学) 低温物理实验室决定升级他们的多部极低温仪器，并将仪器的气体供应系统集中化和自动化，于是聘请低温实验物理博士 Rob Blaauwgeers 负责。

2006年，自动化集中式气体供应系统建设完成，同时展开了干式  $^3\text{He}-^4\text{He}$  稀释制冷机的设计与制作。Blaauwgeers 随后邀请他的同学 Pieter Vorselman (低温工程硕士) 一起参与优化设计。



BlueFors 两位创立者(图片取自该公司网页)

2007年，首部干式稀释制冷机在 Aalto 大学低温物理实验室纳米组(NANO Group)顺利运转。

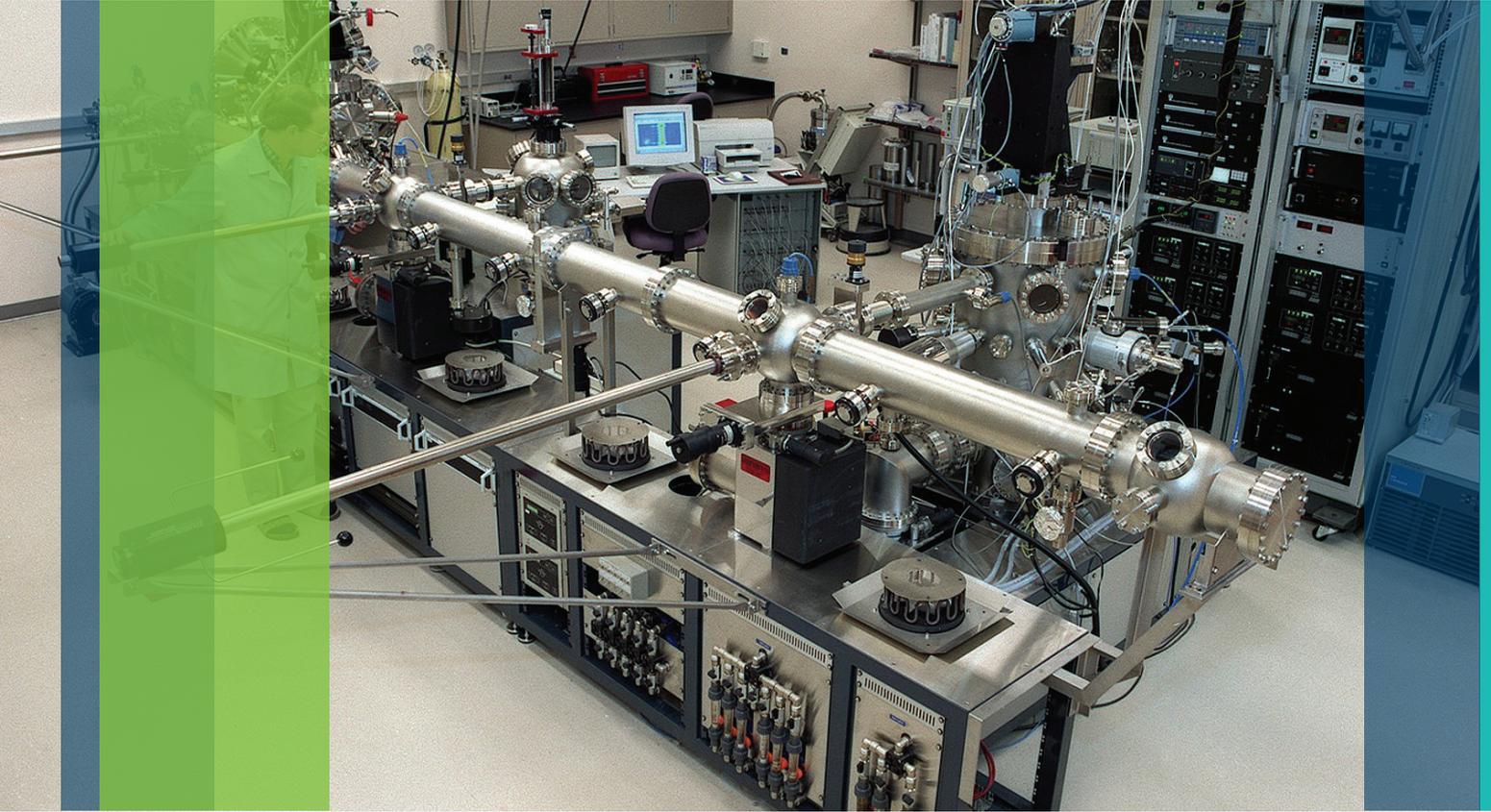
2008年，Blaauwgeers 与 Vorselman 创立公司，并结合两人的姓做为公司名字，即 BlueFors。

如今，BlueFors 公司雇用员工超过 500 人，营业额约 1.6 亿欧元。更值得骄傲的则是，网络上各国的跨国老牌或新创公司、研究机构或大学，在宣扬他们开发量子计算机的突破进展时所展示的精彩图片中，大半将 BlueFors 干式稀释制冷机置于显著位置。

BlueFors 干式稀释制冷机无疑是当前知识经济的典范(之一)!

我个人心目中的“知识经济”(science-based technology)是指“发展知识经济需要扎实的科学原理基础和精湛的实验技术，而且要对知识的深化及其前沿应用具有敬意，以知识领先(从而受人尊敬)为傲，而不仅止于追求公司的最高营业额”。远在 BlueFors 之前，电子显微镜(利用电子波长)、扫描隧道电子显微镜(利用量子隧穿效应)和磁共振造影(利用质子核磁矩和超导磁铁)等，都是基于量子力学原理的知识经济的典范。

(台湾阳明交通大学 林志忠 供稿)



## 超高真空真空科研装置完美选择

### —安捷伦离子溅射 + 钛升华复合真空泵

- 双泵组合，节省空间
- 单一抽气接口，安装方便
- 超大抽速，超长寿命
- 封闭抽气，杜绝返流
- 皮实耐用，无惧破空
- 无运动部件，零噪音无振动



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部  
800 820 6778（固定电话拨打）  
400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，  
或登陆安捷伦官方网站：[www.agilent.com](http://www.agilent.com)  
(点击“产品”选择“真空产品”)。