

越野滑雪队员的第二层“肌肤”

翟萌萌 韩旭 丛东明 王长明 程海涵

零下20度，承德坝上草原训练场，技术研发团队成员及运动员在环湖训练场进行场测，与此同时，冬奥中心教练员、吉林体育学院杨明教授在办公室就可以通过可视化系统清楚地看到：“心率、配速、高度信息、位置信息……如此多的数据不仅可以精准定位、实时监控，还可以反复观看，太让人震惊了！”

越野滑雪在冬季奥运会比赛项目中有“雪上马拉松”之称，最主要比拼的是运动员的耐力和体力。你是否好奇运动员如何发挥潜力、创造佳绩，又有什么科技力量隐藏在运动训练中？让教练员可以通过电脑屏幕反复观看运动员训练的相关信息，这不仅依靠丰富的经验，还通过精准的

数据，为每一位运动员量身定制更科学的训练方案。这项运动背后，来自清华的科技力量发挥着重要作用！

零下20度的挑战

2020年12月，在清华大学航天航空学院冯雪教授的领导下，一支由清华大学柔性电子技术研究中心（以下简称“柔电中心”）和浙江清华柔性电子技术研究院（以下简称“柔电院”）组成的联合研发团队自驾赶赴零下20度的承德坝上草原训练场实地勘探。

由于室外滑雪项目只能在冬季进行，项目立项时，距离训练结束只剩几个月的时间，需要赶在结束前，让产品尽快服务到运动员，如果赶不上室外训练环节，

则只能等待下一年。研发团队需要在短时间内，在气温极低、地形多变的恶劣环境中，对高速滑行的运动员进行长时间、大范围监测，教练员们还提出希望将运动场景可视化、能监测实时位置信息并实现运动员生理监测数据的无线传输等要求。

出京后山路居多，厚厚的积雪覆盖了路面，不熟悉地形的团队成员驾驶的车辆险些因道路湿滑侧翻！每每回忆起来，他们仍然心有余悸。平时6小时的路程，队员们花了整整一天才赶到训练基地。而且为了赶时间，队员们都是在车上自带食品解决饮食问题。

困难远不止于此。传统设备在高山滑雪剧烈的运动下，无法正常运转。剧烈运动状态下产生的大量汗液导致设备与人体的脱粘，影响了心电监测设备信号的稳定性。部分导电织物所制备的电极材料也因为运动中界面阻抗变化大，导致电势差波动剧烈，从而无法准确获取人体生理信号。低温环境下，设备电池也无法正常供电。常规锂电池及干电池在低温下内阻增大，电压下降严重，无法驱动设备。



滑雪赛道数字化分析与展示系统

设备在采集到人体生理信息后需要将电压数字、位置信息等上传后台，数据量大，需要大带宽的设备进行上传。野外无线信号难以覆盖，实时上传也存在问题……种种困难给年轻的团队提出了挑战。

能打硬仗的年轻团队

为了找到最优解决方案，如期交付项目，这支年轻的团队经常一起头脑风暴，白天开会讨论，晚上加班实施，办公楼灯光长夜不熄。在90后团队负责人、柔电中心博士后陈毅豪的带领下，团队热火朝天地投入到了“007”工作模式中。

为了应对低温，团队成员开发出耐低温达 -40°C 的电池，解决了极端环境下设备电池无法正常供电的问题；又攻克野外WIFI难以覆盖等技术难点，研发出集成了柔性温度传感器、柔性心电传感器、蓝牙4G数据中转主机和集成柔性电极的胸带，加上后台数据中心和前端监控软件，三部分协同合作，系统化地实现了运动员生理参数的数字化监控。

而针对运动员群体的特殊性，更着力于研发更舒适、轻便、不影响运动的佩戴装备。最终根据越野队教练员及运动员的要求，采用服装集成技术，将柔性电极贴片埋入运动员平时使用的胸带

之中，采用导电皮革材料开发了织物电极，并将手机中的定位、通讯、导航模块改进为柔性材料后，直接应用于胸带之中。既缓解了运动员对陌生监测设备佩戴的不适感，又兼顾了舒适性的要求。

120天：研发、改进到完善

2020年，柔性电子技术以其轻、薄、柔、小的特点，受到了国家体育总局冬季运动管理中心的关注。2020年底，陈毅豪开始带领研发团队探索如何将柔性电子技术应用于越野滑雪队可视化可穿戴训练监测系统。

从2020年底确定开发方案，后经多次改进，2021年2月基本结束研发，4月根据越野滑雪特殊场景新需求，有针对性地进行改进，直至成熟。2021年5月，“三维可视化训练监测系统”正式服务于中国越野滑雪队员，为运动员备战2022冬奥会，提升运动训练能力发挥了重要作用。

“三维可视化训练监测系统”由胸带和可视化系统组成。运动员穿戴柔性生理监测绑带，设备采集运动员的心率、心电、体温、位置、高程信息后通过自带的4G模块回传到可视化系统。设备数据经过解算，获取运动员生理信息、3D位置信息、高度信息和速度信息等重要数据。

“能在这么短的时间内完成这项富有挑战性的任务，一方面得益于团队在柔性可穿戴电子技术方面的积累，冯雪教授团队在心电监测领域深耕已久，相关科研成果已经完成成果转化，并已取得医疗级设备认证。另一方面也是得益于清华大学校地合作模式框架下，探索并打造的‘校内虚体，校外实体’的创新性科研成果转化机制。”陈毅豪介绍说。

“服务冬奥对整个团队来说是一座光荣的里程碑，但柔电技术的成果转化及应用，会一直在路上。”陈毅豪说。柔性电子技术的应用前景广阔，在其他运动中也有很大的发展潜力。大众健身、医疗健康、装备结构健康监测等领域都可以借助柔性电子技术实现精准监测与服务。

1月20日，中国越野滑雪队踏上北京冬奥会的征程。冬奥积分赛上，中国越野滑雪实现突破，完成了冬奥会12个小项全项目参赛的目标。2月16日，中国越野滑雪队男、女子团体短距离半决赛，虽然最终中国队均以一名之差无缘决赛，但越野滑雪健儿所展现出的拼搏精神必将载入史册。清华柔性电子技术研发团队为此提供了技术保障，也由此踏上了新的研发征程，希望未来有更多机会助力健儿创造历史、书写辉煌。