

# 基于坐标标定的北斗 RTK 和 UWB 变电站联合定位方法

王宝乐, 林 朋

(国网陕西省电力公司咸阳供电公司, 陕西 咸阳 712000)

**摘 要:** 变电站复杂环境对定位提出了较高的要求。提出一种联合定位方法, 结合室外区域北斗 RTK 高精度定位和室内 UWB 超宽带定位各自的优势, 设计一种联合定位方法, 并通过标定参考点, 求解出室内 UWB 基站的绝对坐标, 使得室内定位和室外定位统一到同一个坐标体系下, 在过渡区域采用越区切换准则实现两种系统的平滑过渡。通过在变电站实地测试, 表明提出的定位方法能够在室内外复杂环境下实现稳定定位, 且定位精度良好, 满足变电站日常工作的定位要求。

**关键词:** 变电站; 室内外定位; 北斗 RTK; 超宽带定位; 坐标标定

中图分类号: TM72; TN929.5 文献标识码: A DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222684

中文引用格式: 王宝乐, 林朋. 基于坐标标定的北斗 RTK 和 UWB 变电站联合定位方法[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 156-160.

英文引用格式: Wang Baole, Lin Peng. Joint positioning method of Beidou RTK and UWB in transformer substation based on coordinate calibration[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 156-160.

## Joint positioning method of Beidou RTK and UWB in transformer substation based on coordinate calibration

Wang Baole, Lin Peng

(Shaanxi Power Company Xianyang Power Supply Company, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** The complex environment of transformer substation puts forward higher requirements for positioning. In this paper, a joint positioning method is proposed. Combined with the advantages of high-precision positioning of Beidou RTK in the outdoor area and UWB in the indoor area, the absolute coordinates of the indoor UWB base station are solved by calibrating the reference points, so that the indoor positioning and outdoor positioning are unified into the same coordinate system, and the handover criterion is adopted in the transition area to realize the smooth transition of the two systems. Through the field test in the substation, it shows that the proposed positioning method can achieve stable positioning in the indoor and outdoor complex environment, and the positioning accuracy is good, which can meet the positioning requirements of the daily work of the substation.

**Key words:** transformer substation; indoor and outdoor positioning; Beidou RTK; ultra wideband positioning; coordinate calibration

### 0 引言

变电站是电力系统重要的组成部分, 含有多种类型的电气设备。在变电站内各项工作中, 常常需要定位人员的位置, 以避免进入危险区域, 保障人员安全。当前的定位方法中, 有基于 GPS 和北斗卫星的室外定位<sup>[1-2]</sup>, 也有基于 WiFi、ZigBee、蓝牙和超宽带(Ultra WideBand, UWB)等无线信号的室内定位<sup>[3-7]</sup>。室外定位给出的是绝对位置, 室内定位给出的是相对位置。

变电站既有室外区域也有室内区域, 因此需要有一种能兼顾全域的定位方法。由于卫星信号无法

穿越到建筑物内部, 而室外往往没有相关无线信号覆盖, 因此通常的做法是融合两种定位系统来进行室内外的联合定位。文献[8]将 UWB 基站作为伪卫星实现一种 GPS 和 UWB 融合的定位方法, 但是由于待测点到 UWB 基站的距离与到 GPS 的距离相差太远, 导致融合效果不好; 文献[9]将 GPS 信号的 UWB 信号放在一起, 通过 k 邻近算法实现定位, 但是室内外环境下经常无法同时收到两种信号, 因此这种方法的实用性不高。文献[10]提出研究了过渡区域不同信号的特性, 提出一种直线外引法的联合切换方法, 来提升北斗三号的定位精度。这些融合

方法的定位精度常常不能达到满意效果。

实际上,当前建成的北斗三号卫星系统在信号结构和调制方式上相比北斗二号已做了全面升级,使得信号捕获灵敏度更高、定位精度也更高。在采用载波相位差分技术时,定位精度可达亚厘米级。采用北斗定位技术,也符合我国当前快速推进北斗系统应用升级、推动电网企业军民融合深度发展的战略需求。因此,结合 UWB 室内定位的优势,本文提出一种联合北斗 RTK 和 UWB 的变电站室内外定位方法,发挥两种系统各自的优势分别定位室内外区域,并通过坐标统一和越区切换实现整个系统的无缝切换。

## 1 北斗 RTK 高精度定位

北斗三号设计了多种恒包络复用技术,在 3 个频点播发 5 个公开载波信号,包括 2 个北斗二号现有信号 B1I/B3I 和 3 个新增信号 B1C/B2a/B2b。B1C 位于 L1 频段中央,中心频率为 1.575 GHz,允许更大的信号带宽。采用 QMBOC 调制,使得接收机可以获得更高的测距精度和抗多径性能<sup>[11]</sup>。B2a 信号采用 QPSK(10) 调制方式,相较 B2I 带宽扩展 5 倍,性能显著提升。B2b 为混合业务信号,在 3 颗 IGSO 和 24 颗 MEO 卫星播发,其信息速率较高,不仅可作为导航信号独立定位,也可作为全球短报文通信和国际搜救服务。

北斗卫星定位过程需要至少 4 颗可见卫星。传统的定位方法是地面接收机捕获到卫星广播的电文后,解析载波上调制的 C/A 码和 NH 码获得卫星历以及信号发送时刻等信息,再结合信号接收时刻得到信号传播时间,乘以光速得到接收机到卫星的距离。有了接收机到 3 颗不同卫星之间的距离,通过三球交会原理解算出接收机的空间三维坐标。4 星定位方法消除了卫星高精度原子钟和地面接收机时钟之间精度不一致造成的钟差,但并未消除电离层、对流层延迟误差和星历误差,并且因为 C/A 码频率较低,一个码长对应实际 300 m,因此即使做到 1% 的误差精度也会导致定位精度只能维持在米级<sup>[12]</sup>。

北斗 RTK 技术改进了测距方法,不再使用频率较低的测距码,而是直接使用载波相位进行测距,如式(1)所示:

$$\rho = \lambda \cdot (\varphi_s - \varphi_R) \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  是载波波长,  $\varphi_s$  是载波发送相位,  $\varphi_R$  是载波接收相位,这里的相位包含了整周期部分和小数部分。由于载波的频率超过 1.5 GHz,一个波长对应只有约不到 20 cm,因此,若误差精度控制在 1% 时,测距精度将达到 2 mm,因此可以大大提升定位精度。

载波相位测距过程中的需要消除接收机和卫星的钟差、电离层误差、对流层误差以及载波相位的整数模糊度<sup>[13]</sup>。下面给出了差分、双差、三差公式:

$$\begin{cases} \Delta^s(\varphi_{1,1,1}) = \varphi_{1,2,1} - \varphi_{1,1,1} \\ \Delta^r(\Delta^s(\varphi_{1,1,1})) = (\varphi_{2,2,1} - \varphi_{1,2,1}) - (\varphi_{2,1,1} - \varphi_{1,1,1}) \\ \Delta^t(\Delta^r(\Delta^s(\varphi_{1,1,1}))) = ((\varphi_{2,2,2} - \varphi_{1,2,2}) - (\varphi_{2,2,1} - \varphi_{1,2,1})) \\ \quad - ((\varphi_{2,1,2} - \varphi_{1,1,2}) - (\varphi_{2,1,1} - \varphi_{1,1,1})) \end{cases} \quad (2)$$

在式(2)中,第一行公式表示一个接收机同时对卫星 1 和卫星 2 进行载波相位测量的差分,可以消除接收机钟差;第二行公式表示对两个不同的接收机从第一行公式得到的差分再次进行差分,可以消除卫星钟差;第三行公式表示对不同时刻从第二行公式得到的差分结果再进行一次差分,可以消除载波相位的整数模糊度,电离层、对流层误差和星历误差。

因此,在变电站内配置一个固定的 RTK 基准站,提前标定好精确的实际坐标。RTK 基准站在定位过程中,将会得到观测位置与实际坐标的偏差,将这个偏差广播给变电站内其他正在定位的北斗 RTK 接收机。通过与北斗 RTK 基准站实时联合解算,接收机可以获得自身的精确定位,系统结构如图 1 所示。经过偏差校正之后,接收机定位精度可达到厘米级甚至毫米级。RTK 定位接收机的输出结果是符合 CGCS2000 中国大地标准坐标系的三维坐标  $(X, Y, H)$ 。

## 2 UWB 基站标准坐标标定

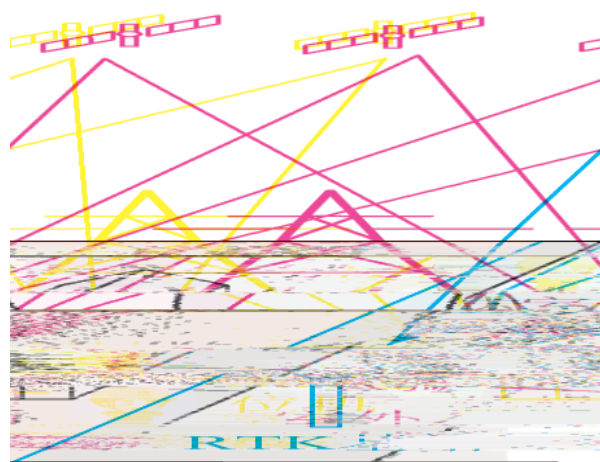


图 1 北斗 RTK 定位系统示意图

### 2.1 UWB 超宽带定位

UWB 是一种非正弦窄脉冲信号,脉冲宽度极小,持续时间为亚纳秒级,频率覆盖范围为 3~10 GHz,功率谱密度极低,信道带宽超过 500 MHz,这些特性使得 UWB 具有非常精确的定位精度。在变电站室内定位的应用中,UWB 的定位精度可以达到 10 cm 级别。

UWB 定位需要在室内布置 3 个以上的基站,待定位的节点称为标签。标签收到基站之间的脉冲信号后,根据信号飞行时间和双边测距法测出自己与各个基站之间的距离,然后再同样利用三球交会原理计算出自身位置。由于在定位过程中是没有绝对坐标参考的,因此定位方法是相对定位,需要用户自定义位置坐标系。

## 2.2 基于参考点转换的坐标标定

为了实现北斗 RTK 定位和 UWB 定位实现联合定位,提出一种 UWB 坐标转换到北斗坐标的方法,将两者的坐标系系统一起来。设 UWB 基站共有  $n$  个,标记为  $\{U_i:(x_i,y_i,z_i)|i=1\cdots n\}$ ,  $x_i,y_i,z_i$  为基站在自定义坐标系中的坐标值。由于基站一般位于室内,无法通过北斗 RTK 定位直接获得绝对坐标值,因此可通过参考点标定的方法来求得基站坐标,如图 2 所示。

首先,在变电站室外区域选取  $m$  个固定位置  $\{S_j|j=1\cdots m,m\geq 2\}$  作为第一参考点,通过北斗 RTK 高精度定位得到每个  $S_j$  的定位坐标  $S_j(X_j,Y_j,Z_j)$ 。

其次,在  $S_j$  和 UWB 基站  $U_i$  之间选定一组第二参考点  $\{B_k|k\geq 2\}$ 。  $B_k$  位于室外区域和室内区域的交界处,点位的选取要求该点能与两个以上的  $S_j$  精确测距,同时也能与室内 UWB 基站  $U_i$  之间精确测距。在没有遮挡的条件下,使用 UWB 测距或者激光测距即可完成。由于所处的位置可能受到遮挡,因此不能通过北斗 RTK 来精确定位,但可以利用  $S_j$  来求解  $B_k$  的绝对坐标。

如图 2 所示,第二参考点  $B_k$  与第一参考点  $S_j^1$  和  $S_j^2$  之间的距离可以测得,分别为  $d_1$  和  $d_2$ ,则  $B_k$  将位于分别以  $S_j^1$  和  $S_j^2$  为球心,  $d_1$  和  $d_2$  为半径的两个球面的交线,是一个圆周,其方程为下面的表达式:

$$\begin{cases} (a_k - X_j^1)^2 + (b_k - Y_j^1)^2 + (c_k - H_j^1)^2 = d_1^2 \\ (a_k - X_j^2)^2 + (b_k - Y_j^2)^2 + (c_k - H_j^2)^2 = d_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $(a_k, b_k, c_k)$  是  $B_k$  的坐标。在实际中,  $B_k$  与  $S_j$  的相对高差是容易获得的,因此,通过任一个  $S_j$  的  $H_j$  可得到  $c_k$  的值,然后求解方程(1),得到  $a_k$  和  $b_k$ 。类似地,

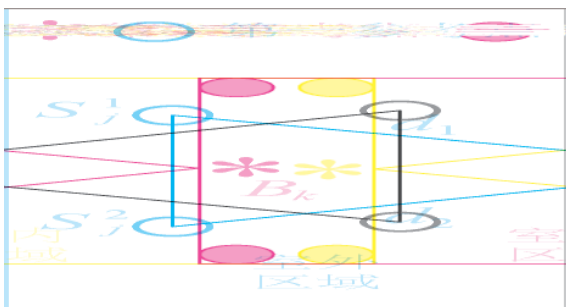


图 2 坐标求解过程示意图

求得所有其他第二参考点的绝对坐标。

最后求所有 UWB 基站的绝对坐标。同样的,每个 UWB 基站与两个第二参考点之间可精确测距,因此,再次应用上面的方法即可求出所有 UWB 基站的绝对坐标,求出的坐标符合中国大地坐标系 CGCS2000 标准。

## 3 室内外高精度联合定位

为了实现变电站室内外高精度联合定位,在 UWB 基站坐标标定点基础上,提出室外北斗 RTK+室内 UWB 的联合定位系统。由于两者各自的定位精度都已经很高,并且两者的信号很少有相互重叠的区域,因此不需要采用两者的融合定位方法,只需要分别负责各自的定位区域即可。要在同一个定位系统中兼容两种定位,还需要解决如下两个问题:

(1)统一坐标系。由上一节,已经获得了所有 UWB 基站的绝对坐标。通常在室内定位阶段,标签  $P$  定位后得到相对坐标  $(p_x, p_y, p_z)$ 。在提出的系统中,UWB 定位过程中直接输入 UWB 基站的绝对坐标,代替自定义坐标,可以直接输出标签  $P$  的符合中国大地坐标系 CGCS2000 标准的坐标  $(p_x^*, p_y^*, p_z^*)$ ,省去了坐标系转换的过程,降低了联合定位的复杂度。

(2)越区切换。在室内外交界处,存在定位系统的越区切换。为了实现平滑的越区切换,采用基于门限阈值的相对信号强度准则<sup>[14]</sup>来完成。从室外过渡到室内时,当信号强度大于定位门限值的可用北斗卫星数量少于 4 颗、同时信号强度大于定位门限值的 UWB 基站达到 4 台时,进行系统切换,否则不切换;当从室内过渡到室外时,当信号强度大于定位门限值的 UWB 基站少于 4 台、同时信号强度大于定位门限值的可用北斗卫星数量达到 4 颗时,进行系统切换,否则不切换。采用这种越区切换准则,避免了不必要的频繁切换带来的定位漂移甚至定位失锁问题。

室内外高精度联合定位的系统框图如图 3 所示。基于高精度定位,系统容易设计出路径规划、越界报警、电子围栏等

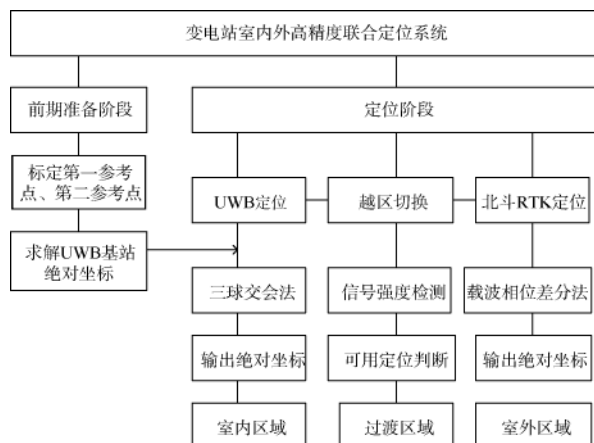


图 3 变电站室内外高精度联合定位系统框图



多种功能模块,并结合电子地图给出人员的实时位置。

#### 4 实验结果

在某变电站进行了定位实验,室外定位选用中海达 V30 北斗工程型 GNSS 接收机 RTK 测量系统,室内定位是基于 UWB RTLS1000 无线测距室内定位开发模组和 STM32F101R6 单片机自行研制的定位系统。在室外区域用 RTK 系统标定了 6 个第一参考点,在室内外过渡区域选择了 3 个第二参考点,室内 UWB 基站数量为 4 个。测试过程选取了 30 个待测点,其中位于开放的室外区域、过渡区域、封闭的室内区域各 10 个点,并在不同时段进行了多次定位测试,每个点位统计出平均测量偏差,实验结果如图 4 所示。可以看出,室外定位精度优于室内,平均水平精度为 2 cm,高程精度为 5 cm,室内的定位精度水平和高程均在 18 cm,而在过渡区域,有的点位可以使用北斗 RTK 定位,有些点位只能使用 UWB 定位,因此,定位数据表现出一定的跳跃性。总体来看,定位效果是十分优良的。

#### 5 结论

本文提出了一种变电站室内外联合定位方法,考虑到室内外定位信号的不同,分别采用北斗 RTK

高精度定位和 UWB 定位两种系统,为了实现联合定位,提出坐标标定方法将 UWB 定位坐标统一到绝对坐标系下,在室内外过渡区域通过越区切换方法实现平滑过渡和无缝链接。所提出的方法在变电站实地进行了多次测试,实验效果良好,满足变电站日常工作的定位要求,并且由于所提方法将 UWB 局部定位坐标统一到与北斗 RTK 定位相一致的中国大地坐标系,因此可在更大区域内不同变电站之间方便地建立统一的联合定位系统。

#### 参考文献

- [1] 李建刚,李红慧,柴祥君,等. GPS、BDS、GPS+BDS 精密单点定位精度评估[J]. 测绘通报, 2021(9): 124-129
- [2] 李博,方形. 北斗卫星导航系统(BDS)在智能电网的应用与展望[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 107-116.
- [3] 曹以龙,景晓娟,景旭川. 基于 INS 定位和 WIFI 指纹定位技术的无人机室内定位方法研究[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(6): 608-612.
- [4] 岳丽娜,李媛媛,李卫斌,等. KWNN 算法在无线室内定位中 K 值研究[C]// 第六届中国卫星导航学术年会论文集-S03 精密定轨与精密定位, 2015: 129-132.
- [5] 宁传文. ZigBee 在煤矿井下人员定位中的设计应用[J].

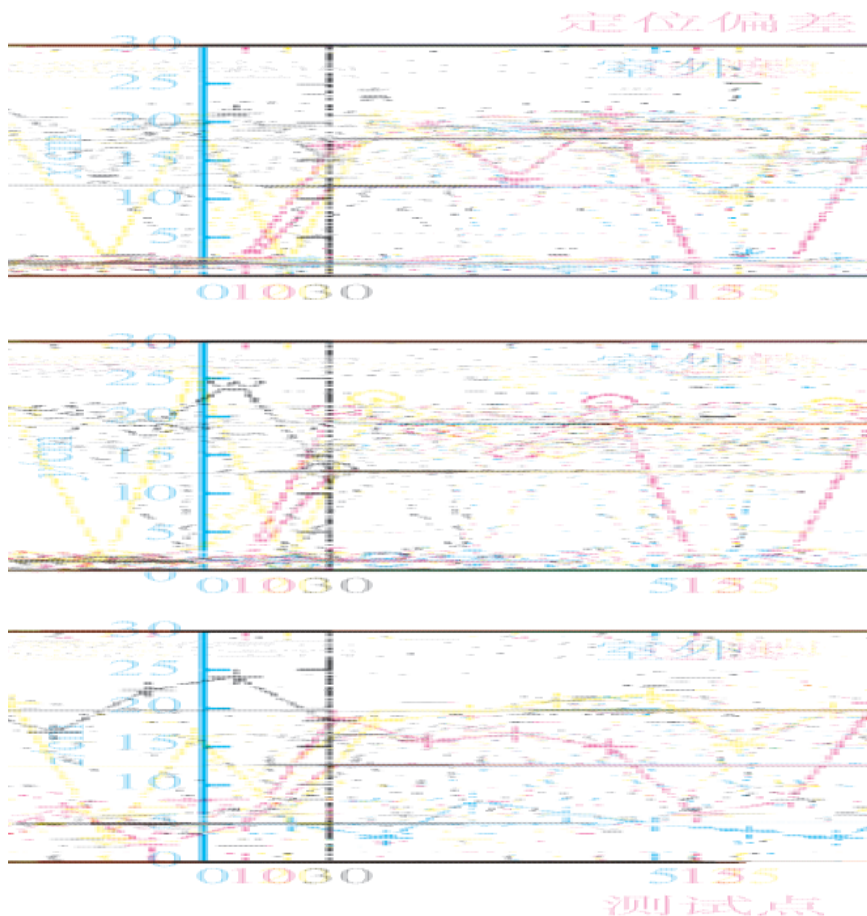


图 4 变电站室内外定位测试结果

- 机电工程技术,2020,49(12):182-184.
- [6] 葛敏婕,赵子涵.基于蓝牙技术的物联网室内定位系统[J].物联网技术,2021,11(11):52-57.
- [7] 缪巍巍,刘世栋.基于UWB技术的变电站精确定位系统研究[J].电力信息与通信技术,2015,13(7):43-49.
- [8] 吴探诗.基于GNSS与UWB组合的无缝定位研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2015.
- [9] 张佩.基于UWB和GNSS的一体化无缝定位系统的研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2019.
- [10] 蔡逸豪,王潜心,朱美国,等.北斗/超宽带组合定位的室内外过渡区无缝链接方法[J].全球定位系统,2021,46(3):78-84.
- [11] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821.
- [12] 黄子源,黄劲松.一种网络RTK对流层斜延迟的估计

- 方法[J].测绘地理信息,2021,46(6):13-16.
- [13] 赵姣姣,曲江华,袁洪.北斗RNSS-RDSS组合模糊度解算方法[J].测绘学报,2016,45(4):404-410.
- [14] 刘云毅,赵军辉,王传云.高速铁路宽带无线通信系统越区切换技术[J].电信科学,2017,33(11):37-46.

(收稿日期:2022-03-01)

### 作者简介:

王宝乐(1987-),男,本科,工程师,主要研究方向:断路器、隔离开关等变电设备运检、电气试验、带电检测及在线监测技术。

林朋(1985-),男,本科,工程师,主要研究方向:断路器、隔离开关等变电设备运检、电气试验、带电检测及在线监测技术。



扫码下载电子文档

## “健康医疗微电子”专栏征稿

以集成电路为代表的微电子技术不断改变着世界的面貌,如今其应用正在从“计算机、通信、信息处理”等传统IT领域向“健康医疗、能源、环保”等多学科交叉融合的崭新领域拓展。微纳电子技术与生命科学的融合,形成了形式多样、功能强大的创新性的工具和方法,助力生命科学、健康医疗的研究及应用。为了及时、集中地反应我国健康医疗领域微电子技术的最新发展及应用成果,《电子技术应用》拟在2023年第1期出版“健康医疗微电子”专栏,主要刊登反应微纳电子技术在健康医疗领域中具有创新性的科研成果和应用技术进展的论文、简报、综述和消息。欢迎相关领域的专家学者、科研人员踊跃投稿!

### 1. 专栏特约主编

中国科学院微电子研究所/中国科学院大学 黄成军 研究员/教授  
华中科技大学光学与电子信息学院/武汉光电国家研究中心 刘欢 教授  
北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 朱疆 教授

### 2. 征稿范围

征文涉及的领域包括但不限于:

- (1) 应用于生命健康的新型传感材料、器件与系统;
- (2) 生物-微电子机械技术(Bio-MEMS),生物传感器;
- (3) 柔性电子技术,可穿戴及植入式微纳传感器,芯片技术及微系统;
- (4) 先进脑机接口器件、芯片及微系统;
- (5) 微流控技术与芯片实验室系统,光流控技术;
- (6) 用于新冠病毒快速检测的新型生物传感技术;
- (7) 量子点材料生物医学应用;
- (8) 面向疾病早筛的人体呼出气传感器;
- (9) 健康医疗成像技术及图像处理。

3. 稿件要求:文章需具有创新性且未在其他期刊公开发表过。文中图表需清晰,文字规范。详见《电子技术应用》投稿须知(<http://www.chinaaet.com/paper/notice/>)。

4. 截稿日期:2022年11月20日。

5. 投稿方式:请登录《电子技术应用》官网(<http://www.ChinaAET.com/>),投稿页面中选择“健康医疗微电子”专栏投稿,按要求提交。

专栏编辑:毕晓东(010-82306085;bixd@chinaaet.com)

## 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