

基于动态心电信号的实时身份识别算法

卢 阳, 鲍淑娣*, 周 翔, 陈金恒

(宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

(*通信作者电子邮箱 shudi.bao@nbut.edu.cn)

摘 要:心电图(ECG)信号因其具备易于监测、个体唯一性等特点在生物识别领域受到广泛关注。针对身份识别的准确性和实时性问题,给出一种快速鲁棒的、适用于微型化嵌入式平台的心电信号身份识别算法。首先,利用动态阈值法提取稳定波形用于快速生成心电模板样本和测试样本;然后,基于优化动态时间弯曲(DTW)法进行差异度计算得到识别结果;其次,考虑心电信号为非稳态时变信号,为保证模板数据与人体体征状况的一致性,对心电模板库进行动态更新管理以进一步提高识别准确性与鲁棒性。对 MIT-BIH 心律失常数据库和自建心电数据库的分析结果表明:所述算法的识别成功率最高达到 98.6%;在安卓移动端,动态阈值与优化 DTW 法一次运算平均时间分别约为 59.5 ms 和 26.0 ms,实时性能显著提高。

关键词:生物识别;心电信号;嵌入式平台;动态阈值;动态时间弯曲法

中图分类号: TP309; TN911.73 **文献标志码:** A

Real-time human identification algorithm based on dynamic electrocardiogram signals

LU Yang, BAO Shudi*, ZHOU Xiang, CHEN Jinheng

(School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo Zhejiang 315016, China)

Abstract: Electrocardiogram (ECG) signal has attracted widespread interest for the potential use in biometrics due to its ease-of-monitoring and individual uniqueness. To address the accuracy and real-time performance problem of human identification, a fast and robust ECG-based identification algorithm was proposed in this study, which was particularly suitable for miniaturized embedded platforms. Firstly, a dynamic-threshold method was used to extract stable ECG waveforms as template samples and test samples; then, based on a modified Dynamic Time Warping (DTW) method, the degree of difference between matching samples was calculated to reach a result of recognition. Considering that ECG is a kind of time-varying and non-stationary signals, ECG template database should be dynamically updated to ensure the consistency of the template and body status and further improve recognition accuracy and robustness. The analysis results with MIT-BIH Arrhythmia database and own experimental data show that the proposed algorithm has an accuracy rate at 98.6%. On the other hand, the average running times of dynamic threshold setting and optimized DTW algorithms on Android mobile terminals are about 59.5 ms and 26.0 ms respectively, which demonstrates a significantly improved real-time performance.

Key words: biometric identification; Electrocardiogram (ECG) signal; embedded platform; dynamic threshold; Dynamic Time Warping (DTW) method

0 引言

移动医疗是一种将移动计算、医学传感器和通信技术融为一体的新兴医疗保健模式,具有低成本、广覆盖、实时监控等优点,其广泛应用将有效缓解社会老龄化和慢性疾病年轻化加剧与医疗资源严重短缺之间的矛盾^[1-2]。穿戴式生物传感器是移动医疗系统的健康数据采集前端,可在自然状态下对使用者的体征状况进行实时连续监测,进而有望实现疾病的早发现、早诊断和早治疗。在实际应用中,穿戴式生物传感器往往需要在一个群体内共享。例如,一个家庭可能为减少开支而共用一套移动医疗设备,而移动医疗用户之间也很可能发生设备交叉误用的情况。实际上,为了保障医疗数据存储的准确性,移动医疗系统需要一种简易且无需用户操作的

身份识别方案,以解决因多人共享或共用同一传感器而引入的用户身份识别问题^[3]。

作为人体的重要生命体征参数之一,心电图(Electrocardiogram, ECG)信号不仅是移动医疗系统中不可或缺的监测内容,而且现有研究也表明其可以作为一种新型的生物识别特征用于对识别分辨率要求不高的应用场合^[4-11]。与传统生物识别技术^[12]相比,利用心电信号进行身份识别具有以下优点:1)活体识别,人体心电不易被其他设备模拟;2)心电是人体固有特征,无需用户记忆与过多操作;3)心电信号采集方便,极易在移动医疗系统中加载身份识别模块;4)心电信号是时间序列,存储和运行时间开销低。

近年来,研究人员提出了一系列基于心电信号的身份识别算法,并对算法准确性进行了鉴别或识别验证。鉴别指按

收稿日期:2014-08-18;修回日期:2014-09-24。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102087);浙江省自然科学基金资助项目(LY14F010005)。

作者简介:卢阳(1992-),男,浙江余姚人,主要研究方向:健康物联网、网络安全;鲍淑娣(1977-),女,浙江宁波人,副教授,博士,主要研究方向:信息安全、驱感网、健康物联网;周翔(1994-),男,浙江金华人,主要研究方向:生物识别、网络信息系统;陈金恒(1993-),男,浙江丽水人,主要研究方向:物联网。

照一对一的原则来验证某一受试用户的身份要求,而识别指按照一对多的原则对受试者进行有效用户身份识别;给定相同的样本数据,由于验证范围不同,鉴别较识别有更佳结果^[4]。文献[5]采用经典自相关和线性判别分析法对22个人的心电数据进行识别验证,得到8.7%的等错误率;文献[6-7]均采用小波变换去噪并提取特征参数,运用支持向量机进行学习并分类,两种方法均只给出鉴别结果,其中文献[6]针对MIT-BIH数据库中18个正常心电图得到最高98.7%的准确率,文献[7]针对MIT-BIH数据库中30个心电图(其中21个为正常、9个为不正常)得到最高96.84%的准确率。文献[8]利用Hermite多项式扩展和支持向量机提取时域特征,并在同态域利用高期混合模型提取倒谱特征,针对MIT-BIH数据库中18个正常心电图得到最佳0.5%的等错误率;但该研究对算法实时性能没有分析。文献[9]采用Gabor原子库对心电信号进行基于MP(Matching Pursuit)的稀疏分解而得到特征参数,并采用支持向量机进行分类,针对20人心电信号进行鉴别测试得到95.3%的正确率。本研究团队前期在文献[10-11]中提出利用分段线性表示法对心电信号进行降维降噪,并应用动态时间弯曲(Dynamic Time Warping, DTW)法进行差异度测算,针对MIT-BIH数据库18人正常心电图可获得100%的鉴别结果。

本文进一步研究具有更强识别鲁棒性能、适用于智能移动平台的心电信号身份识别算法。该算法能面向不同实验对象动态设定阈值,有效截取并筛选包含完整心电周期信息的稳定波段作为心电样本模板,并利用经优化的动态时间弯曲(DTW)算法实现测试样本与模板样本差异度的高效计算,提高识别准确性与稳定性。由于心电信号是非稳态时变信号,在不同生理阶段存在一定变异,本文还提出样本模板库的动态管理,以保证模板的典型性,提高身份识别算法的准确性与鲁棒性。针对MIT-BIH心律失常数据库和自建心电数据库的分析结果表明,识别成功率最高达到98.6%。在安卓移动端,动态阈值与优化动态时间弯曲法一次运算平均时间分别约为59.5 ms和26.0 ms,具备良好实时性能。

1 算法描述

基于心电信号的身份识别系统包含注册和识别两个阶段。其中:注册阶段生成用户心电模板数据库,侧重于心电数据的准确性和典型性;识别阶段采集用户心电数据并进行身份识别,注重识别准确性和实时性。在具有心电信号监测功能的移动医疗系统中,心电身份识别可实现用户健康数据的准确存储而无需用户干预。本文提出一种适用于智能移动平台、具有更强识别鲁棒性能的心电信号身份识别算法,其整体流程如图1所示。

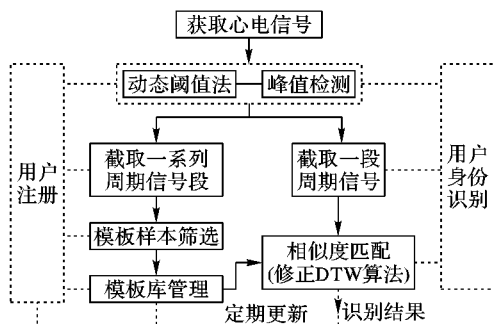


图1 心电身份识别算法整体流程

1.1 动态阈值法

利用包含完整心电信息的3个连续R点之间的ECG波段可以避免心电波形起点不一、匹配率不高的问题。考虑心电信号是非稳态时变信号,且不同人之间的心电幅值差异较大,为保证波段提取的准确性,本文提出一种简单、灵活的动态阈值设定方法(亦称为游标扫描法),其流程如图2所示。

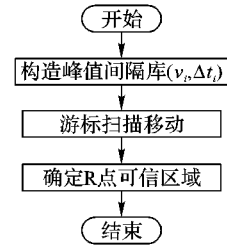


图2 动态阈值法算法流程

首先设定一个宽泛阈值条件,从一段连续心电波形检测出足够多的波峰,记作 $\{(v_i, t_i) \mid i = 0, 1, \dots, N\}$,计算前后波峰时间差并得到 $\{(v_i, \Delta t_i) \mid i = 1, 2, \dots, N\}$;然后,采用游标扫描法获取峰值间隔的集中分布区域即为R点的可信区域。如图3所示,从纵横两个方向分别进行游标扫描法,得到峰值阈值范围 (V_1, V_2) 和时间间隔阈值范围 (T_1, T_2) 。例如,对 Δt 轴进行扫描时,游标从最左端向右扫描,选择点数最多的区域。具体地,根据式(1)和式(2)分别计算得游标的宽度 w 和移动速率 v :

$$w = (\max(\Delta t_i) - \min(\Delta t_i)) \times p; \quad 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

$$v = \left(\sum_{i=1}^{N-1} |\Delta t_{i+1} - \Delta t_i| \right) / (N-1) \quad (2)$$

其中 p 为游标宽度与总宽度的预设比值。

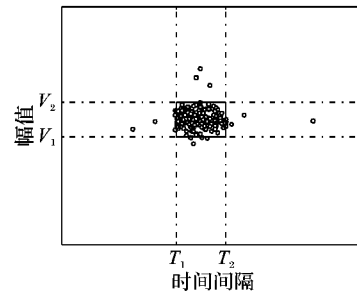


图3 动态阈值法示意图

1.2 样本管理

与其他身份识别系统相同,心电样本分为模板样本和测试样本。在筛选模板样本时应注重典型性,而在获取测试样本则更注重实时性。从前述动态阈值法的可信区域中筛选最接近阈值范围中值的连续3个峰点,将其所对应的心电波段作为模板样本。测试样本可利用可信区域基于实时采集的心电信号进行即时筛选。

考虑心电信号是非稳态时变信号,在不同生理阶段存在一定差异,本文进一步提出对心电模板库进行动态管理,定时将成功识别的心电测试样本与相应用户的模板样本进行融合处理并更新模板样本,从而保证模板库的典型性,提高身份识别系统的准确性与鲁棒性。

1.3 实时身份识别

在用户身份识别阶段,利用经优化的动态时间弯曲法计算测试样本和模板库所有模板样本之间的差异度。为提高运算实时性,减少存储空间开销,将原距离矩阵的构造过程与最短加权路径求解结合起来。模板样本与测试样本可分别表示

为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 其中 m, n 分别为样本 S 和 T 的长度; 令 $A = \{a_i | 0 \leq i \leq m-1\}$ 和 $B = \{b_j | 0 \leq j \leq n-1\}$ 分别代表距离矩阵的某行与某列。首先构造第 1 行与第 1 列, 即 $a_i = d(s_i, t_1) = \sqrt{(s_i - t_1)^2}$ 与 $b_j = d(s_1, t_j) = \sqrt{(s_1 - t_j)^2}$; 然后将原 DTW 算法的最短路径求解公式转化为基于 Dijkstra 思想的 a_i 更新计算, 即:

$$a_i = \begin{cases} b_j, & i = 0 \\ \sqrt{(s_i - t_j)^2} + \min(a_i, b_{i-1}, a_{i-1}), & 1 \leq i \leq m-1 \end{cases} \quad (3)$$

用式(3)对 A 进行 $n-1$ 轮更新计算, 其中 j 的变化范围为 $[1, n-1]$ 。当 $j = n-1$ 时, a_{m-1} 即为原距离矩阵的最短加权路径距离, 记作 D 。进一步考虑心电图样本长度对差异度计算的影响, 将模板样本 S 与测试样本 T 的差异度修正为:

$$D' = D / (m + n) \quad (4)$$

2 性能分析

利用自建心电数据库和 MIT-BIH 心律失常数据库对心电图身份识别算法的准确性和实时性进行验证。自建心电数据采自 20 位健康对象, 其中: 男性 10 位, 女性 10 位, 年龄范围为 20~43 岁, 平均年龄 28 岁。每位实验对象在坐姿和心率平缓条件下采集 30 min 心电信号, 采样率为 250 Hz。另从 MIT-BIH 心律失常数据库随机选取 20 人 30 min 的心电数据, 采样率为 360 Hz。对所有心电数据进行采样率与幅值的归一

化处理。

实验分析得到的错误接收率 (False Acceptance Rate, FAR) 与错误拒绝率 (False Rejection Rate, FRR) 结果如图 4~5 所示。将识别正确率定义为 $1 - (FAR + FRR) / 2$ 。在 MIT-BIH 心律失常数据库下, 当判断阈值设为 24.20 时, FAR 为 2.30%, FRR 为 0.50%, 识别成功率达到 98.60%, 而原 DTW 算法的最大识别成功率为 95.40%。在自建数据库下, 当判断阈值设为 16.40 时, FAR 为 10.50%, FRR 为 1.20%, 识别成功率达到 94.15%, 而原 DTW 算法的最大识别成功率为 87.0%。表 1 给出了两个数据库各条件下的识别成功率。由表 1 可见, 对模板进行筛选后, 可将识别成功率最高提高 6.8%; 在心电波形匹配时若考虑长度因素可将识别成功率最高提高 1.10%。总体而言, MIT-BIH 心律失常数据库的识别结果显著优于自建数据库, 其主要原因是心律失常心电图数据更具有用户独特性。

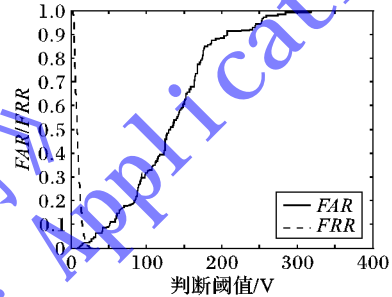


图 4 MIT-BIH 心律失常数据库下有筛选有长度因子的 FAR/FRR 曲线

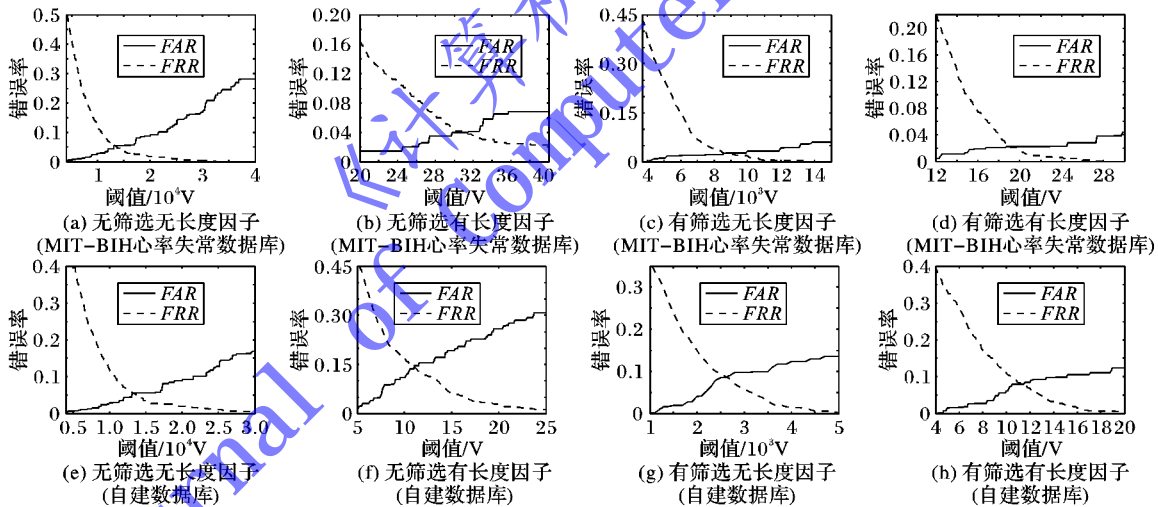


图 5 两个数据库和不同条件下相关算法的 FAR/FRR 部分放大

表 1 识别成功率对比

数据库	有无长度因子	识别成功率 / %	
		无筛选	有筛选
自建数据库	D	87.00	93.20
	$D' = D / (m + n)$	87.35	94.15
MIT-BIH 心律失常数据库	D	95.40	98.10
	$D' = D / (m + n)$	96.50	98.60

在时间复杂度方面, 所述心电图身份识别算法两个核心部分 (即动态阈值法和优化动态时间弯曲法) 的时间复杂度理论分析结果分别为 $O(n)$ 和 $O(n^2)$ 。进一步在安卓手机平台上对算法进行实时性能验证, 测试结果表明, 动态阈值与优化动态时间弯曲法一次运算平均时间分别约为 59.5 ms 和 26.0 ms, 具备良好的实时性能。

3 结语

本文在前期工作基础上, 进一步提出了一种快速、鲁棒、适用于微型化嵌入式平台的心电信号身份识别算法, 识别成功率最高达 98.6%。该算法通过采用动态阈值法, 快速、准确地提取心电图模板样本和测试样本, 并通过动态管理模板库保证模板样本与人体体征状况的一致性。在身份识别阶段, 采用经优化的动态时间弯曲法进行差异度计算, 避免构建距离矩阵, 并去除长度因素对识别结果的干扰, 在大大节省运行时间与存储空间的同时, 提高了识别准确性与鲁棒性。下一步研究工作将扩大实验数据规模, 扩展实验对象的年龄层次和人群多样性, 进一步验证并提高算法的准确性和广泛适用性。

(下转第 293 页)

斯涌出量趋势演化的在线动态预测,可推广到其他工程领域。

参考文献:

- [1] FU H, XIE S, XU Y, *et al.* Study on MPSO-WLS-SVM based mine gas emission prediction model [J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(5): 56 - 61. (付华, 谢森, 徐耀松, 等. 基于 MPSO-WLS-SVM 的矿井瓦斯涌出量预测模型研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(5): 56 - 61.)
- [2] YIN G, LI M, LI W, *et al.* Model of coal gas permeability prediction based on improved BP neural network [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(7): 1179 - 1184. (尹光志, 李铭辉, 李文璞, 等. 基于改进 BP 神经网络的煤体瓦斯渗透率预测模型[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(7): 1179 - 1184.)
- [3] LYU F, LIANG B, SUN W, *et al.* Gas emission quantity prediction of working face based on principal component regression analysis method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 113 - 116. (吕伏, 梁冰, 孙维吉, 等. 基于主成分回归分析法的回采工作面瓦斯涌出量预测[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 113 - 116.)
- [4] SHAO L, ZHANG Y. Mine gas gushing forecasting based on wavelet theory support vector machine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(s1): 104 - 107. (邵良杉, 张宇. 基于小波理论的支持向量机瓦斯涌出量的预测[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(s1): 104 - 107.)
- [5] WEI C, LI Y, SUN J, *et al.* Gas emission rate prediction in coal mine by grey and separated resources prediction method [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(4): 628 - 632. (魏春荣, 李艳霞, 孙建华, 等. 灰色-分源预测法对煤矿瓦斯涌出量的应用研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(4): 628 - 632.)
- [6] YAN F. Research on application of least square support vector machines and unscented Kalman filter in state estimation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (闫飞. 状态估计中最小二乘支持向量机与无迹卡尔曼滤波的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.)
- [7] LI C, JIANG X. Kalman filter based on SVM innovation update for predicting state-of health of VRLA batteries [C]// *Applied Informatics and Communication*. Berlin: Springer, 2011: 125 - 147.
- [8] TEIXEIRA C, DIREITO B, BANDARABADI M, *et al.* Output regularization of SVM seizure predictors: Kalman filter versus the “firing power” method [C]// *Proceedings of the 2012 Annual International Conference on Engineering in Medicine and Biology Society*. Piscataway: IEEE, 2012: 6530 - 6533.
- [9] RUBIO G, POMARES H, ROJAS I, *et al.* A heuristic method for parameter selection in LS-SVM: application to time series prediction [J]. *International Journal of Forecasting*, 2011, 27(3): 725 - 739.
- [10] WANG X, LIU J, LU J. Gas emission quantity forecasting based on virtual state variables and Kalman filter [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(1): 80 - 85. (王晓路, 刘建, 卢建军. 基于虚拟状态变量的卡尔曼滤波瓦斯涌出量预测[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(1): 80 - 85.)
- [11] HE L. Nonlinear characteristic analysis and study of the theory for prediction and simulation about gas emission in the working faces of coal mine [D]. Changsha: Central South University, 2009. (何利文. 煤矿回采工作面瓦斯涌出非线性特性分析及预测仿真理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.)
- [12] DINI D H, MANDIC D P, JULIER S J. A widely linear complex unscented Kalman filter [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(11): 623 - 626.
- [13] LIN J, CHEN C, PENG C. Kalman filter decision systems for debris flow hazard assessment [J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(3): 1255 - 1266.

(上接第 264 页)

参考文献:

- [1] ISTEPANAIAN R S H, ZHANG, Y T. Guest editorial introduction to the special section: 4G health-the long-term evolution of m-health [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2012, 16(1): 1 - 5.
- [2] YANG G. Body sensor networks [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2014: 6 - 11.
- [3] ZHOU X, LU Y, CHEN M, *et al.* A method of ECG template extraction for biometrics applications [C]// *Proceedings of the 36th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Piscataway: IEEE, 2014: 602 - 605.
- [4] LOURENCO A, SILVA H, FRED A. ECG-based biometrics: a real time classification approach [C]// *Proceedings of the 2012 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing*. Piscataway: IEEE, 2012: 1 - 6.
- [5] ZHAO C, WYSOCKI T, AGRAFIOTI F, *et al.* Securing handheld devices and fingerprint readers with ECG biometrics [C]// *Proceedings of IEEE 5th International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems*. Piscataway: IEEE, 2012: 150 - 155.
- [6] KAVEH A, CHUNG W. Temporal and spectral features of single lead ECG for human identification [C]// *Proceedings of the 2013 IEEE Workshop on Biometric Measurements and Systems for Security and Medical Applications*. Piscataway: IEEE, 2013: 17 - 21.
- [7] LYU G, CHEN L. ECG human identification based on wavelet transforms and support vector machine [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(24): 195 - 199. (吕刚, 陈立. 小波变换和支持向量机相融合的 ECG 身份识别[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(24): 195 - 199.)
- [8] LI M, NARAYANAN S. Robust ECG biometrics by fusing temporal and cepstral information [C]// *Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE, 2010: 1326 - 1329.
- [9] YANG L, ZHAO Z. ECG identification based on MP sparse decomposition [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2011, 31(4): 98 - 101. (杨雷, 赵治栋. 基于 MP 稀疏分解的心电身份识别[J]. *杭州电子科技大学学报*, 2011, 34(4): 98 - 101.)
- [10] SHEN J, BAO S, YANG L, *et al.* The PLR-DTW method for ECG based biometric identification [C]// *Proceedings of the 33rd Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Piscataway: IEEE, 2011: 5248 - 5251.
- [11] YANG L, SHEN J, BAO S, *et al.* Biometric identification method for ECG based on the Piecewise Linear Representation (PLR) and Dynamic Time Warping (DTW) [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2013, 30(5): 976 - 981. (杨立才, 沈君, 鲍淑娣, 等. 基于 PLR 和 DTW 的 ECG 身份识别方法[J]. *生物医学工程学报*, 2013, 30(5): 976 - 981.)
- [12] JAIN A K, ROSS A A, NANDAKUMAR K. Introduction to biometrics [M]. Berlin: Springer, 2011: 1 - 4.