

基于 AnyLogic 的优化采样检测仿真

崔得谦 史安恒 魏佳坤 陈一铎 张绍文

天津科技大学经济与管理学院 天津 300450

【摘要】：采样检测是保障卫生安全的有效手段，为了节省采样时间，运用因果图、SWOT 分析、层次分析法和排队论对高校采样流程进行研究，提出预约采样的解决方案，运用 Anylogic 进行仿真验证。研究结果表明，优化方案实现了节省排队时间、降低人员流动、提高服务效率等预期目标。研究成果具有普适性，为学校等场所合理组织采样检测工作提供科学的理论依据和方法指导。

【关键词】：采样检测；预约系统；排队论；层次分析法；AnyLogic

Simulation of optimized sampling detection based on AnyLogic

Deqian Cui, Anheng Shi, Jiakun Wei, Yiduo Chen, Shaowen Zhang

School of Economics and Management Tianjin University of Science and Technology Tianjin 300450

Abstract: Sampling detection is an effective means to ensure health and safety. In order to save sampling time, the sampling process of colleges and universities is studied by using cause-and-effect diagram, SWOT analysis, analytic hierarchy process and queuing theory, and the solution of reservation sampling is proposed, and the simulation verification is carried out by using Analogic. The research results show that the optimization scheme achieves the expected objectives of saving queuing time, reducing personnel flow and improving service efficiency. The research results are universal and provide scientific theoretical basis and methodological guidance for the reasonable organization of sampling and testing work in schools and other places.

Keywords: Sampling detection; Reservation system; Queuing theory; Analytic hierarchy process; AnyLogic

至 2022 年 10 月，全国仍面临疫情的严峻考验，面对无法预测的病毒传播，面对各类人员在全国范围内的流动，我们只能通过采样检测的方式控制病毒的扩散与传播。截至目前，全国已累计做采样次数 115 亿次，每日采样检测已达 1600 万份。经过此次考验，我们知晓采样检测是预防病毒的重要手段，在今后的预防类似事件发生具有重要意义。但在执行过程中，仍存在公众参与采样时因排队时间过长引发不满；排队人数众多导致新冠病毒感染率提高；交叉感染风险大等问题^[1]。社区、商超、高校等高密度人员流动场所实施全员大筛。然而全市或全区紧急大筛易造成人员拥堵，接触风险以及交叉感染风险大大增加。为此，研究如何提升采样服务效率，无疑具有重要意义^[2]。

本文将针对采样中的瓶颈工序——采样排队等待时间以及高密度人员流动性进行研究，并基于 AnyLogic 构建天津科技大学采样仿真模型，在不改变现场人力、物力的情况下提出采样预约方案，将采样人群按照类似学校等拥有组织结构的场所单元化，实现采样流程系统性优化。

1 基于层次分析法的采样流程分析

1.1 层次分析法概述

层次分析法，简称 AHP，是指将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。本文将与决策“采样优化方案”总是有关的元素分解成目标层——“采样 SOTW 分析”、准则层——“优

势、劣势、机会、威胁”、方案层——“SWOT 分析具体内容”。

通过如图 1 的因果图对现有流程进行分析，寻找影响采样效率的因素，对可能导致采样效率不高的各方面因素进行梳理后，建立层次结构模型。通过对学校发放的问卷调查为参考，将采样过程中等待时间过长、排队队伍长、场地利用率等因素两两互相比对，针对所有因素采用相对尺度，以尽可能减少因为因素对应性质不同等诸多因素造成相互比较的困难，从而提高精确度。为要素 i 与要素 j 重要性比较结果，对表 1 中的 16 个方案层进行重要性等级赋值。其中判断矩阵有如下性质：

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

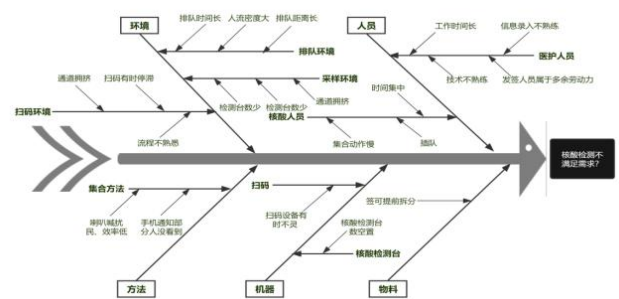


图 1 采样检测鱼骨图

1.2 分析现采样流程问题

针对现检测流程梳理分析,形成如图 1 所示因果图,可直观总结将导致采样不合理的关键因素归纳为:①医务人员不熟练;②采样服务台少;③检查信息模式单一;④排队时间长。不同层面的影响因素很可能单个或联合起来使得采样检测满意度产生判断偏差。

为建立层次结构模型,从 2022 年 8 月 24 日至 9 月 30 日发放调查问卷,共收集 1628 份有效问卷。通过对问卷的分析,将近一半的学生认为需要将教工或第三方与学生群体分开排队。最近一次的采样中超过 6 成以上的同学排队时长超过了 35 分钟,而大家的预期值在 5 分钟以内。

整理上述问题后基于 SWOT 分析法对采样流程分析其优势、劣势、机会和威胁等多种影响因素,从而建立对应的层次分析结构如表 1 所示。

表 1 采样层次分析结构

目标层	准则层	方案层
核酸检测 (D)	优势 (S)	S1大学生相对便于管理; S2核酸检测实现预约; S3借鉴成功方案; S4场地宽裕
	劣势 (W)	W1医务人员不熟练; W2核酸采样服务台少; W3检查信息模式单一; W4排队时间长;
	机会 (O)	O1核酸检测已成常态化; O2核酸检测区域化; O3预约小程序实现; O4医护人员充裕
	威胁 (T)	T1核酸场地利用率低; T2人员流动多且慢; T3核酸点距离远; T4易造成交叉感染

1.3 构建判断矩阵并进行一致性检验

将调查结果进行汇总分析,进而构建有关准则层四种指标因素的判断矩阵 D,以及方案层中优势 S,劣势 W,机会 O 及威胁 T 的判断矩阵^[4]:

$$D = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{10} & 1 & \frac{1}{10} \\ 10 & 1 & 5 & 2 \\ 1 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{10} \\ 10 & \frac{1}{2} & 10 & 1 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} & 3 & 1 \\ 5 & 1 & 4 & 4 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{4} & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{3}{10} \\ 1 & 1 & 1 & \frac{3}{10} \\ 2 & 1 & 1 & \frac{2}{5} \\ \frac{10}{3} & \frac{10}{3} & \frac{5}{2} & 1 \end{pmatrix}$$

$$O = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{4} & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 4 & 5 \\ 1 & \frac{1}{4} & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{10} & \frac{1}{5} & 1 \\ 10 & 1 & 5 & 5 \\ 5 & \frac{1}{5} & 1 & 3 \\ 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

通过层次单排序的方法求解相应的判断矩阵,对其进行归一化处理得到具体的特征向量以及最大特征根。经计算所得各判断矩阵的特征向量如下:

1.4 影响因素权重排序

上述各方案层矩阵均通过了一致性检验,从而可以针对方案层中各因素对准则层四种因素的重要程度进行层次总排序,结果如下:

$$W_D = \begin{pmatrix} 0.0485 \\ 0.4855 \\ 0.0577 \\ 0.4082 \end{pmatrix}, W_S = \begin{pmatrix} 0.1657 \\ 0.5955 \\ 0.0805 \\ 0.1583 \end{pmatrix}, W_W = \begin{pmatrix} 0.1352 \\ 0.1608 \\ 0.2054 \\ 0.4987 \end{pmatrix}, W_O = \begin{pmatrix} 0.1648 \\ 0.5863 \\ 0.1386 \\ 0.1102 \end{pmatrix}, W_T = \begin{pmatrix} 0.0609 \\ 0.6438 \\ 0.2131 \\ 0.0823 \end{pmatrix}$$

结果发现,采样的现行流程中存在的劣势以及面临的威胁所占比重较大。将准则层中优势、劣势、机会和威胁四个因素的特征向量分别与方案层中各因素对应特征向量相乘得出各个影响因素的重要性权重^[4],如上表 1 所示。方案层中重要性权重排名前五的因素依次是 S2、O3、S1、S4、O4。这表明采样流程的新方案应该更加注重减少人员流量、减少等待时间。

2 基于排队论的采样流程分析

2.1 排队论概述

排队论又称为随机服务系统理论,在此排队系统中受服务的对象统称为“采样人员”,提供服务的称为“医护人员”。起点的每位采样人员到达服务窗口,按照排队规则排队等候采样,窗口按照服务规则开展采样工作,采样人员接受采样之后离开。在这个模型中顾客希望等待时间或逗留时间越短越好,从而可提供服务的窗口个数越多越好。但增加窗口数,就意味着成本增加。因此,该模型的优化需要同时考虑采样人员满意度与成本。排队系统中的关键评价指标有:登记时间、等待时间、采样时间、队伍长度和服务台的忙期等^[5]。

在排队论系统中,根据排队论,(1)排队系统中有 C (C ≥ 1) 个采样位点独立并行进行采样;(2)排队系统中学生的到达率服从泊松分布;(3)排队的系统中采样区进行采样的平均服务时间服从负指数分布;(4)排队系统的服务原则为先到先服务(FCFS)。基于此,采样模型基本服从^[6],在达到平稳状态后,依据排队论可以实现对采样系统的分析,以测得的各项数据来定量分析计算平均排队等待人数、平均逗留人数、平均排队等待时间、平均逗留时间。等系统运行指标,再以医务人员服务强度为依据,计算在一定时间内完成全部采样任务所需采样位点的最优预测值。

2.2 现场测量与计算

通过现场调研约有 4009 人进行采样,采用 20 合 1 混采样模式,初始设有 5 个采样位点,登记和采样的相关数据如表 2 和表 3 所示。

表2 改善前采样登记时间统计数据

组数	1	2	3	4	5	6	7	8
登记时间/s	130	109	132	112	131	109	129	103
组数	9	10	11	12	13	14	15	16
登记时间/s	125	121	120	125	110	117	118	111
平均时间	118.88							

表3 改善前采样时间统计数据

组数	1	2	3	4	5	6	7	8
登记时间/s	242	210	222	180	212	209	189	195
组数	9	10	11	12	13	14	15	16
登记时间/s	192	196	192	214	211	259	269	260
平均时间	215.75							

在该排队系统中,以20人一组作为一个整体,研究每组在排队系统行进中的各项运行指标。由表3和表4可知,每组采样平均时间为215.75s,每组的平均登记时间为118.88s,计算最优检测位点时可作参考^[7]。由以上数据可得每组服务时间为215.75s,即服务率 $\mu=16.69$ 组/h。若规定采样大筛任务需在3h内完成,则至少需要 $4009 \div 16.69 \div 20 \div 3=4.0034$ 个检测位点,即 $C \geq 5$,才能保证医护人员服务强度 $\rho < 1$,此时系统的平均到达率 $\lambda=66.82$ 组/h,根据M/M/C/ ∞/∞ /FCFS排队模型的各项运行指标的计算公式如下:

(1) 医护人员服务强度:

$$\rho = \frac{\lambda}{C\mu} \quad (1)$$

(2) 空闲概率:

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{C-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \frac{1}{C!} \cdot \frac{1}{1-\rho} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^C \right]^{-1} \quad (2)$$

(3) 平均排队长(即系统中正在排队等待服务的人数):

$$L_q = \frac{(C\rho)^C \rho}{C! (1-\rho)^2} P_0 \quad (3)$$

(4) 平均队长(即排队等待的人数与正在接受服务的人数之和):

$$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (4)$$

(5) 平均等待时间(即在系统中排队等待服务的时间):

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (5)$$

(6) 平均逗留时间(即排队等待时间与被服务时间之和):

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (6)$$

通过计算得到该排队系统各项运行指标如表4所示:

表4 全员大筛排队论计算结果

检测位点 数(个)	服务强度 ρ	空闲概率 P_0	平均排队 长 L_q (组)	平均队长 L_s (组)	平均等待时 间 W_q (min)	平均逗留时 间 W_s (min)
4	1.01	-	-	-	-	-
5	0.80	0.012940	2.20843	6.21202	1.98302	5.57799
6	0.67	0.016578	0.59787	4.60146	0.53684	4.13182
7	0.57	0.017756	0.17485	4.17844	0.15700	3.75197

$\rho > 1$ 时,意味着排队长度越来越长,学生长时间等待用“—”表示

综合考虑新冠病毒传染风险、学生等待时间成本、医务人员工作成本及登记区所需时间,此情形下的采样位点最优值为5。

3 Anylogic 建模

3.1 改善前分析

利用工业工程流程分析法对现采样场地进行线路图以及流程图分析,天津科技大学滨海校区西院的采样检测大致由三个区域组成,分别为排队等待区、登记区、核检区,其多队列多检测位点排队模型及空间布局,绘制相应的采样检测线路图和采样检测流程图,如图2和图3所示。

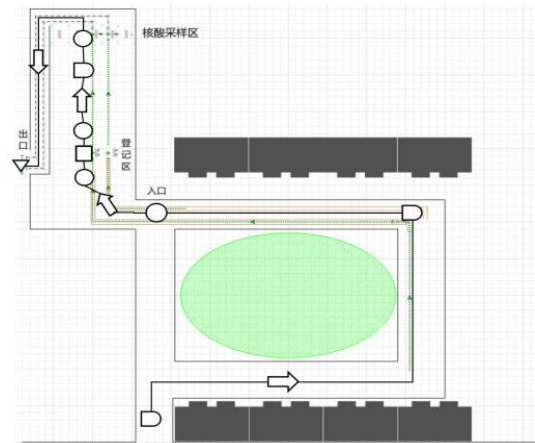


图2 改善前采样检测线路图

工作名称: 核酸检测流程分析 编号: 01 开始: 2022年9月1日 结束: 2022年10月1日 方法: 先行方法	统计			
	项目	次数	时间/min	距离/m
活动	等待	4	20.35	53
	移动	4	5	195
	等待	3	17	
	检查	1	0.05	
符号	等待	1	0	
	移动	1	0	
	等待	1	0	
	移动	1	0	
说明	距离/m	时间/min	符号	
1 等待核酸通知		10	○	→
2 到达核酸场地	120	3	→	→
3 在等候区等候		5	○	→
4 等待所在队伍核酸	50	20	○	→
5 志愿者引导进入核酸区域	10	1	○	→
6 医护人员扫码	2	0.1	○	→
7 医护人员检查信息		0.05	○	→
8 医护人员发签	1	0.05	○	→
9 移动到核酸区	30	0.5	○	→
10 等待核酸采样		2	○	→
11 医护人员核酸采样		0.2	○	→
12 离开核酸区域	35	0.5	○	→
13 结束			○	→

图3 改善前采样检测流程图

3.2 优化方案介绍

针对上述问题团队提出预约方案，即通过手机小程序进行线上预约，对采样的时间进一步精细化，这样可避免因排队时间长、排队人员身份混杂导致的交叉感染，而且可减少大量等待时间，具体步骤如下：（1）登陆微信小程序，小程序界面设有最新防疫通告及政策以年级为单位，每位同学可收到住宿公寓采样检测时间及通告；（2）在小程序中完善个人信息，如：学号、姓名、联系电话、所在公寓及宿舍；（3）学生以及教职工可选择采样检测点；（4）在规定采样检测时间内预约；（5）小程序给出用户可预约梯队和位点如图 4 所示；（6）选择位点之后，会弹出采样检测码。

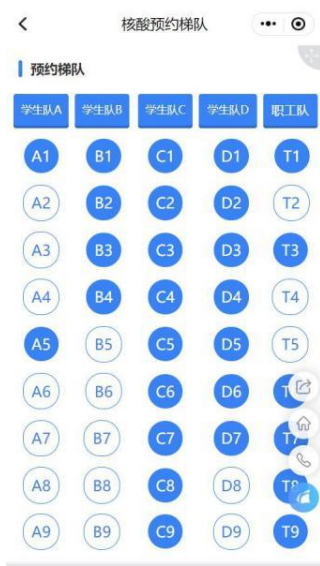


图 4 小程序预约梯队和位点

3.3 Anylogic 模型构建

Anylogic 是一款混合建模的仿真工具，能实现模型的连续与离散。其中人员仿真依托于行人库，行人库通过流程图对行人建模，可视化反应行人流动过程。根据对场地的调研以及分析，我们绘制如图 5 所示场地模拟图，并根据对上述采样的流程分析和改善后流程图如图 6 所示。

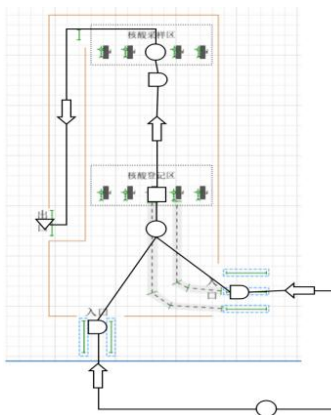


图 5 采样场地绘制图

				统计				
				项目	次数	时间/min	距离/m	人数
工作名称：核酸检测流程分析 编号：02 开始：2022年9月1日 结束：2022年10月1日 方法：改善方法				活动 ○	5	2.95	45	4009
				移动 →	2	3.5	150	
				等待 D	2	4		
				检查 □	1	0.1	2	
				储存 ▽	1			
说明		距离/m	时间/min	符号				
1	手机预约核酸		2	○	→	D	□	▽
2	到达核酸场地	120	3	○	→ D			
3	在等候区等候		2					
4	志愿者引导进入核酸区域	10	0.5	○	→ □			
5	扫码检查信息	2	0.1					
6	医护人员发签		0.05	○	→ D			
7	移动至核酸区	30	0.5					
8	等待核酸采样		2	○	→			
9	医护人员核酸采样		0.2					
10	离开核酸区域	35	0.5	○	→ ▽			
11	结束							

图 6 改善后采样检测流程图

建立采样仿真模型（一般模型和改进模型），如图 7 所示。

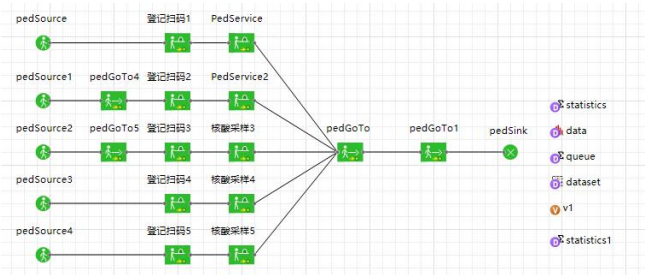


图 7 Anylogic 搭建的采样仿真模型

具体步骤如下：

（1）构建采样登记服务区域和采样服务区域，设定学生出现以及离开的目标线，添加服务队列和服务台^[8]，模拟学生进行采样过程。一般模型的登记和采样区各 2 个服务台，且学生自由根据最短队列服务原则在登记区选择一个队列排队采样；改进模型的登记区和采样区各 5 个服务台^[9]，在此基础上规定采样人员采用预约方式进行采样，并根据上文排队论选取的最优采样位点设定五条学生出现的目标线，五条目标线分别对应一个登记服务台和采样服务台。

（2）构建学生行动流程图，添加学生到达模块（pedSource），到达速率为 1000 人/小时；添加 pedGo To 模块^[10]，规定学生进场及离开路线。

（3）添加采样登记与采样的服务模块（PedService），登记延迟时间为 uniform

(5.9, 6.0) s，采样延迟时间 uniform(10.7, 11.0) s，服务规则为先到先服务（FCFS）；添加学生离开模块（pedSink），通过该模块离开采样系统，结束检测流程。

3.4 仿真及结果分析

本模型对采样服务 1200 秒情况进行模拟。考虑到现实生活中，采样医护人员熟练程度、扫码等因素对采样效率的影响，本模型统计指标设定，评价该采样系统效率的主要指标是学生在该系统的逗留时间，通过分析该模型的数据，建立改善前后逗留时间的对比折线图、改善后学生在该系统中的逗留时间概

率直方图与改善前后队长对比折线图如图 8-10 所示。

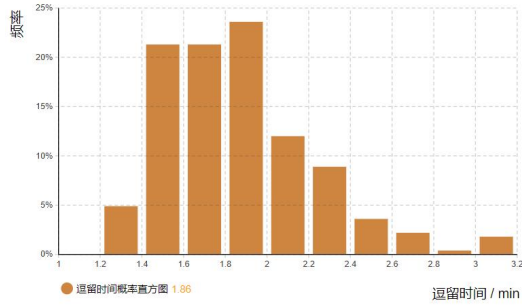


图 8 改善后学生在该系统中的逗留时间概率直方图



图 9 改善前后逗留时间的对比折线图

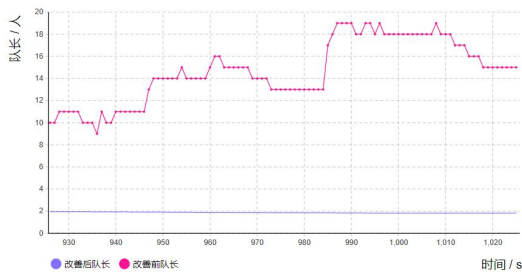


图 10 改善前后队长的对比折线

参考文献:

- [1] 曲林琳,郭伟刚,杨宗兴,等.大规模新型冠状病毒采样检测需求下城市检测基地的流程设计及改进[J].国际检验医学杂志,2021,42(19):2423-2429.
- [2] 余惠敏,常理,吴佳佳.党的二十大代表纵论统筹疫情防控和经济社会发展[N].经济日报,2022.10.20.
- [3] 林拥军,肖恬煦,张曾鹏,谢远昂.基于层次分析法-隶属度理论的混凝土框架结构安全性模糊综合评价方法[J].工业建筑,2022,52(10):28-38+45.
- [4] 吕慧,金秋.3D 打印医疗植入物定价策略影响因素研究[J].价值工程,2021,40(23):19-21.
- [5] 姜涛,路兴政,刘露,黄甫.基于分类服务机制的可预约排队系统设计和定价研究[J].运筹与管理,2022,31(10):113-119.
- [6] 孙敬高,高郡,张峻川,贺烨.带接触匹配的 M/M/C 排队模型[J].数学的实践与认识,2020,50(19):186-192.
- [7] 马剑,李慧文,宋丹丹,陈娟.校园通勤人流时空伴随分析与疫情防控策略[J].中国安全科学学报,2022,32(09):86-93.
- [8] 王冰冰,默秀卿.基于 AnyLogic 仿真的综合医院内科门诊候诊面积指标研究[J].建筑学报,2021(S2):42-46.
- [9] 王冰冰,薛聪聪,王珊.基于排队论和 Anylogic 仿真的三甲医院门诊采血区设计指标研究[J].建筑学报,2020(S2):185-189.
- [10] 杨洋,刘锐群.基于 AnyLogic 的收银服务效率优化研究[J].计算机应用与软件,2020,37(01):82-86+105.
- [11] 郑丹,薛鹏.基于 Anylogic 公共建筑物疏散研究[J].计算机应用与软件,2018,35(06):107-109+128.

通过观察实验,人员流动状况模型能有效地模拟该场地采样一次服务的人员流动以及采样时间。采样人员在进入采样场地之前先用手机进行预约,这样可减少采样等待区域的人员数量,有效减少了交叉感染风险以及等待时间^[11]。经过多次仿真,发现改进模型在队伍长度以及等待时间上比一般模型都有大幅度改进,改进模型在连续模拟 4 个小时下未出现拥堵情况,且综合考虑扫码过程出现问题、医护人员工作不熟悉等客观因素,每人平均等待时间以及采样时间均维持一定值,并通过调研满意度发现采样人员对此持满意态度。

表 6 改善前后时间对比

单位: min	改善前	改善后
每组在等候区等待时间	2.432	24.16
每人在等候区等待时间	1.565	11.125
每梯队平均采样时间	8.899	31.313
每人平均采样时间	5.335	25.436

4 结语

本文针对目前采样检测常态化的大背景,针对高校采样流程进行优化。基于排队论以及层次分析法提出了对采样服务台数以及预约采样的改进方案,并运用 Anylogic 仿真软件对一般采样模型以及改进采样模型进行仿真,综合考虑了被服务人员安全性、交叉感染风险性、服务流程高效性等因素优化采样流程。本文提出的改进模型具有普适性,为高校等场所提供了采样优化思路。