

分类号: _____

学校代码: 11078

学 号: 2111806005



密 级: _____

保密日期: _____

保密期限: _____

广州大学

硕士学位论文

题目: 基于用户体验的动态数学软件评价研究

学 生 类 型: ☒ 双证学术学位研究生
☐ 双证专业学位研究生
☐ 单证专业学位研究生

学 位 申 请 人: 王 婕

导师姓名及职称: 张景中 教授

学 院 (研 究 所) : 计算机科学与网络工程学院

学科专业 (领 域) : 教育技术学 (理学门类)

论 文 提 交 日 期: 二〇二一年六月二日

分类号:
学校代码: 11078
学 号: 2111806005

密 级:
保密日期:
保密期限:

广州大学硕士学位论文

基于用户体验的动态数学软件评价研究

王 婕

学科专业（领域）： 教育技术学（理学门类）

研 究 方 向： 教育软件的研究与应用

论 文 答 辩 日 期： 2021年6月2日

指导教师（签名）： 张新

答辩委员会主席（签名）： 王婕

答辩委员会委员（签名）： 张新

陈联

张作忠

李思冲

摘要

随着网络时代的全面到来，互联网也逐步将重心发展到教育领域。教育信息化的推动有利于培养学生的信息素养，提高学生的教学效率，提升教育公平。教育软件是促进教育信息化的重要手段之一，对推动教学方式和教育改革具有重要的实践意义。动态数学软件是教育软件的产物之一，然而，当前动态数学软件层出不穷，鱼龙混杂，用户在选择动态数学软件上具有较大的盲目性和随机性。当前市场上存在的动态数学软件有以下两点问题，一，软件的可用性、能用性和易用性较差，功能单一不全。二，更加注重软件的可用性和更多的功能和技术，而忽略了用户体验感，难以满足用户的需求，导致学习效果不佳。因此，如何选择一款质量高且合适的动态数学软件成为亟待解决的问题，需要从科学的角度构建动态数学软件评价指标体系，帮助对软件进行质量测评。

本文从用户体验的角度出发，结合用户体验相关理论、动态数学软件和软件评价研究现状及研究方法，构建了基于用户体验的动态数学软件评价指标体系，丰富了我国软件评价体系的研究成果，为学习者和教学人员选择合适动态数学软件提供指导性的策略，还为软件开发人员提供设计和改善思路，有助于规范我国动态数学软件市场的质量管理。为了构建科学的评价指标体系，实现上述的意义，本文主要研究工作及贡献包括：

1. 基于用户体验经典模型的研究，结合动态数学软件独有的学科性以及教与学的理论，提出了以清晰性（Clarity）、可靠性（Credibility）、高效性（Efficiency）、激励性（Motivation）和学科性（Subject）为五大核心要素的动态数学软件 CCEMS 模型，核心要素之间互相联系、互相影响，形成动态平衡的完整模型。

2. 基于 CCEMS 模型，利用德尔菲法修订了预设评价指标体系，确定了 5 个一级指标——清晰性、可用性、高效性、激励性和学科性，以及 15 个二级指标和二级指标评价标准描述；再利用层次分析法确定了各级指标的权重值，最终形成了完整的动态数学软件评价指标体系。

3. 利用基于用户体验的动态数学软件评价指标体系进行应用举例，设计评价方案，对网络画板进行用户体验质量测评。按照评价指标体系的标准设计网络画板调查问卷，发放问卷，收集并整理统计数据，得出每个二级指标的得分和网络画板的加权总分 4.59（5 分制），表明了网络画板在用户体验上表现较好，能满足数学教学的需要。

求。并针对二级指标的得分分析网络画板的不足之处，提出了一些建设性的建议。此应用举例不仅证明了网络画板具有较高的用户体验，也证实了该评价指标体系的可操作性和可实施性。

关键词：动态数学软件；用户体验；CCEMS 模型；评价指标体系；网络画板

ABSTRACT

With the comprehensive arrival of the Internet era, the Internet has gradually developed its focus to the field of education. The promotion of educational informatization is conducive to cultivating students' information literacy, improving students' teaching efficiency and promoting educational fairness. Educational software is one of the important means to promote educational informationization and has important practical significance to promote teaching methods and educational reform. Dynamic mathematics software is one of the products of educational software. However, at present, dynamic mathematics software emerges in an endless stream, and users have greater blindness and randomness in choosing dynamic mathematics software. The current dynamic mathematics software in the market has the following two problems. First, the software's usability, usability and ease of use are poor, and the function is single and incomplete. Second, more attention is paid to the usability and more functions and technologies of the software, but the sense of user experience is ignored, and it is difficult to meet the needs of users, resulting in poor learning effect. Therefore, how to choose a high quality and appropriate dynamic mathematics software has become an urgent problem. It is necessary to build an evaluation index system of dynamic mathematics software from a scientific perspective to help evaluate the quality of the software.

In this paper, from the perspective of the user experience, combined with the user experience theories, dynamic mathematics software and software evaluation research status and research methods, I built the evaluation index system of dynamic mathematics software based on user experience. In the result, I enriched the research of software evaluation system in our country, and provided an instructional strategy for learners and teaching people to choose suitable dynamic mathematics software, also provided the thoughts of design and improvement for software developers, to standardize the quality management of dynamic mathematics software market in China. In order to build a scientific evaluation index system and realize the above significance, the main research work and contributions of this paper include:

1. Based on the research of user experience classic model, combining with dynamic mathematics software unique subjects and the learning theory, I put forward to Clarity, Credibility, Efficiency, Motivation and Subject as five core elements of dynamic mathematics

software CCEMS model. Five core elements interrelate and influence each other to form a complete model of dynamic balance.

2. Based on CCEMS model, Delphi method was used to revise the preset evaluation index system, and five first-level indicators -- Clarity, Credibility, Efficiency, Motivation and Subject were determined, as well as 15 second-level indicators and evaluation standard descriptions of second-level indicators. Then Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to determine the weight value of each index, and finally a complete dynamic mathematics software evaluation index system was formed.

3. The dynamic mathematics software evaluation index system based on user experience was used for an application example, and the evaluation scheme was designed to evaluate the user experience quality of NetPad. According to the standards of the evaluation index system, the questionnaire was designed, the questionnaire was distributed, and the statistical data was collected and sorted out. The score of each secondary index and the weighted total score of the network sketchpad was 4.59 (5-point scale), which showed that NetPad had a good performance in user experience and could meet the needs of mathematics teaching. And in view of the score of the secondary index analysis of the shortcomings of NetPad, I put forward some constructive suggestions. This application example not only proves that NetPad has a high user experience, but also confirms the operability and implementation of the evaluation index system.

Keywords: Dynamic mathematics software, User experience, CCEMS model, The evaluation index system, NetPad

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	2
1.3 研究内容及贡献	3
1.4 研究方法	3
1.5 论文章节安排与研究框架	4
第二章 相关概念及研究	7
2.1 用户体验概述	7
2.2 动态数学软件概述	11
2.3 本章小结	14
第三章 动态数学软件评价模型设计	15
3.1 设计原则	15
3.2 理论基础	16
3.3 动态数学软件 CCEMS 模型分析	19
3.4 本章小结	21
第四章 动态数学软件评价指标体系设计	23
4.1 预设评价指标设计	23
4.2 评价指标专家修订	28
4.3 评价体系指标权重确定	32
4.4 评价指标体系确定	37
4.5 本章小结	38
第五章 动态数学软件评价指标体系应用举例	39
5.1 评价方案	39
5.2 网络画板质量测评	40
5.3 本章小结	45
第六章 总结与展望	47
6.1 研究总结	47
6.2 不足与展望	47
参考文献	49
附录一	53
附录二	57
附录三	61

攻读硕士学位期间发表的论文.....	63
致 谢.....	65

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着网络技术的迅猛发展，新时代赋予了教育信息化新的使命。中国自 20 世纪 90 年代末开始关注信息技术对教育领域的影响，并先后出台了一系列推动教育信息化应用和发展的规划。2018 年 4 月 18 日，教育部关于印发《教育信息化 2.0 行动计划》的通知中提到，教育信息化从 1.0 时代跨入 2.0 时代是顺应智能环境下教育发展的必然选择，教育信息化正朝着网络化、数字化、智能化、个性化、终身化的方向进行，并提出到 2022 年基本实现“三全两高一大”的发展目标，这对于构建教育强国和人力资源强国具有重要意义^[1]。

教育软件是推进教育信息化和教学改革的重要手段之一，在促进数字化学习应用中取得了较大的进步。目前教育软件的发展已与教育云平台进行了有机结合，大量的新的教育资源融入整合到了教育云平台中，成为教育软件的一部分^[2-3]。同时，不断扩大的无线网络技术，智能手机、平板电脑等移动终端也为教育软件的发展提供了重要的硬件基础^[4]。2020 年 9 月 29 日，中国互联网络信息中心（CNNIC）在京发布第 46 次《中国互联网络发展状况统计报告》中提到，截至 2020 年 6 月，我国网民规模达 9.40 亿，较 2020 年 3 月增长 3625 万，互联网普及率达 67.0%，较 2020 年 3 月提升 2.5 个百分点，其中在线教育用户规模达 3.81 亿，占网民整体的 40.5%^[5]。“互联网+教育”也使得各类教育软件层出不穷，截止 2017 年 11 月，我国市场上检测到的移动应用程序中，办公学习类 APP 应用规模为 31.4 万款^[6]。如今教育软件渗透在教育领域的方方面面，越来越得到人们的重视，对推进教育方式改革上有重要的实践意义。

动态数学软件因其灵活性、开放性和便捷性而广泛存在于教育软件市场，国家也投入大量人力和资金进行建设，但是仍有很多动态数学软件的下载量不容乐观，甚至出现无人问津的现状。通过大量的文献调查发现，目前市场上存在的动态数学软件有以下两点问题。一，开发商对数学教育的理解和认知不足，软件的可用性、能用性和易用性较差，功能单一不全，对于可用性较差的软件，客户往往会选择同类型功能齐全的软件替代，导致开发商利润薄弱，无法维持软件的正常运营和维护。二，更加注重可用性的软件会力求提供更多的功能和技术，而忽略了用户体验感，导致用户出现不易学、交互难等情况，难以满足用户的需求，增加学习负担，学习效果不佳^[7]。随着可供选择的同类

型软件数量的逐年增加,用户对于动态数学软件不再满足于技术和功能上,而更关注软件的体验感,即用户体验。在众多动态数学软件趋于平稳发展的格局下,提升用户体验感已经超越功能、可用性等因素,成为动态数学软件脱颖而出的关键要素之一^[8]。

层出不穷的动态数学软件导致了鱼龙混杂、质量参差不齐的现象,张凤丹等人认为:“现阶段我国对于教育软件质量的评估尚缺少专业的评估标准,只能根据用户评分和评论次数两项指标进行评估。通过中国知网进行文献检索,发现关于教育软件评价机制的研究也是寥寥无几。建立完善教育软件质量评价标准,为学习者快速选择优质的教育软件提供便利,同样也给软件开发人员提供了开发指导,将有助于教育应用的再优化,为教育应用的持久发展发挥作用^[9]。”而用户是教育软件的直接使用对象,“以用户为中心的设计”成为产品设计开发的趋势,产品的交互变得日益重要^[10],因此应该从用户体验的角度来构建科学、有效的评价体系,以帮助用户便捷找到高质量、更适合自己的动态数学软件,同时也帮助开发商了解软件在用户体验上存在的问题,为有关部门在软件质量评估和监督上贡献微薄之力。

1.2 研究意义

1.2.1 理论意义

软件交互设计中最重要理念是要以人为本。人性化的设计思想应该受到更多的关注,各学科和以人为本的思想进行融合是现阶段用户体验发展的主要方向,具有时代性和紧迫性。本文中以动态数学软件为研究对象分析及评价其交互的友好性,规范动态数学软件的交互评价模型,可丰富可用性的研究理论体系,为人机交互设计的专业人员提供了新思路与新方法。

1.2.2 实践意义

动态数学软件的用户体验测评能评估产品用户的使用程度,从而关系到软件未来的发展。因此,在动态数学软件产品评测上要充分考虑用户的体验需求,并将用户的体验需求转换为评价要素,才能实现用户体验角度的软件测评。本文针对目前动态数学软件的特殊性和学科性,拟构建动态数学软件的评价模型及评价指标体系,针对软件的不足和优势进行分析,提供参考建议。旨在提升用户的体验感,让用户明白软件在用户体验各要素上的差异。这不仅满足了用户的需求,为用户选择适宜的动态数学软件提供参考

性建议，提高教学的效率，也能帮助软件开发者对软件进行指导性的改进，还能够实现动态数学软件以及教育软件市场的健康发展、持续运营，促进教育市场的规范化管理，促进信息化的发展。

1.3 研究内容及贡献

目前，对动态数学软件的评价主要以考察用户对软件交互设计的主观评价，没有深入分析其内在影响因素，评估方法单一，缺少理论依据和实际操作量化分析。本研究以使用动态数学软件时的用户体验感出发，通过阅读大量文献和综述最新的研究，利用用户体验经典模型和教与学方面的理论，设计动态数学软件评价模型和评价指标体系。因此，从用户体验的角度出发来研究软件的影响因素。主要内容有：

1. 综述有关用户体验和教育软件评价的文献。通过研究用户体验、动态数学软件、教育软件评价体系等相关文献，概述相关概念，重点研究经典的用户体验模型、动态数学软件的评价体系和研究不足之处，对理论进行深度分析和总结，为本文的后续设计实践提供理论支撑。

2. 研究基于用户体验的动态数学软件评价模型。结合经典的用户体验模型和原则以及相关教与学的理论、多媒体学习理论等，结合动态数学软件特点，获取影响用户体验的核心要素，为后续构建基于用户体验的动态数学软件评价指标体系提供参考方向。

3. 构建基于用户体验的动态数学软件评价指标体系。通过德尔菲法和层次分析法对各级指标进行完善、分析和量化，构建适用于动态数学软件的评价指标体系。并对各级指标进行内涵分析，以便后续能高效地完成网络画板的测评研究。

4. 测试基于用户体验的动态数学评价指标体系。对具有代表性的动态数学软件——网络画板进行测试，对其数据进行采集和量化分析，分析网络画板在用户体验上的优劣性，并基于结果给出一些建设性的提升软件质量的建议。

1.4 研究方法

根据研究内容的需要，本次论文主要采用的是文献调查法、德尔菲法、层次分析法和问卷调查。

1. 文献调查法

文献调查法是指通过收集、整理、综述文献资料来对研究内容事实产生科学认识的方法。本研究广泛阅读国内外关于动态数学软件评价和用户体验的相关文献，了解动态

数学软件的评价体系发展历程,借鉴如何从不同的角度结合动态数学软件的特点进行评价,吸收已有教育软件评价体系的优点和总结其不足,学习建立评价指标体系的方法和应用模式,在相关研究的基础之上展开进一步的思考,基于用户体验的视角结合动态数学软件的特点和发展情况,探索建立相应评价指标体系。

2. 德尔菲法

德尔菲法又称专家法,因其简单高效的特点,被广泛地应用于评价指标体系的构建工作当中,对于评价指标体系整体架构和具体指标的修改和完善,以及确定指标权重值的工作都能发挥重要的作用。德尔菲法的一般流程是召集相关领域专家成立专家评审小组,将待解决的问题以问卷或其他形式发放给专业组成员,每位专家基于本人的认知和经验独立地给出评价或指导意见,将各专家意见进行集中,汇总后再反馈给专家进行下一轮的评价指导,循环这一过程直至得出比较理想的结果^[8]。在这过程中,各专家之间的工作必须是独立隔离的,要避免专家之间的信息沟通,方便得出不同侧面不同角度的意见,防止专家的意见统一或趋近,影响评价的效率和效果。

3. 层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP), 是 20 世纪 70 年代美国运筹学家萨蒂教授在研究美国国防部课题时,应用网络系统理论和多目标综合评价方法,提出的一种定性与定量相结合的层次权重决策分析方法,可根据判断层次结构之间的优先次序来确定评价体系各指标的权重。

4. 问卷调查法

在评价指标体系应用举例的部分,邀请使用过被实验的动态数学软件的学生、教师、专家、软件研发人员和 UI 设计师等,根据评价指标体系,应用李克特五点量表的方法设计动态数学软件测评问卷(非常符合—5、基本符合—4、不确定—3、基本不符合—2、完全不符合—1),对被实验的动态数学软件各项指标进行打分,对数据进行收集整理和统计分析,得出相关结论。

1.5 论文章节安排与研究框架

论文框架结构可分为六章:

第一章为绪论。首先梳理教育信息化时代下,动态数学软件及其评价体系的最新现状、存在的问题,并根据存在的问题找到本文研究视角。最后对研究意义、研究内容及贡献、研究方法进行了阐述。

第二章为相关概念及研究。主要是对用户体验和动态数学软件进行理论概述和现状分析。首先对用户体验的定义与构成、用户体验的模型、用户体验的评价进行概述，重点分析了三种经典模型，为后续构建评价模型打下基础；最后综述了动态数学软件的定义、前景发展和动态数学软件评价体系的研究现状，提出本课题研究的必要性。

第三章为基于用户体验的动态数学软件评价模型设计。首先表述建立评价模型需要遵循的四个原则：科学性、系统性、可操作性和特殊性原则。其次，对构建评价模型需要的教与学理论、多媒体学习理论等进行综述和分析。最后，结合用户体验的模型、教与学理论和多媒体学习理论等多种理论，构建了基于用户体验的动态数学软件评价模型（CCEMS 模型），并对该模型的五要素和动态平衡进行了解释说明。

第四章为基于用户体验的动态数学软件评价指标体系设计。根据上述的 CCEMS 模型构建了基于用户体验的动态数学软件预设评价指标体系，并对各指标的内涵和评价标准进行解释。利用德尔菲法对各级指标进行修改和完善，用层次分析法对各级指标授权重值，最终确定了基于用户体验的动态数学软件评价指标体系。

第五章为基于用户体验的动态数学软件评价指标体系应用举例。在评价指标体系的指导下，确定评价对象、评价方法和评价过程，对网络画板进行用户体验质量评估，根据评分标准确定网络画板各级指标得分和总体得分，针对网络画板的优劣性提出一些建设性建议。网络画板的质量评价测试证明了该评价指标体系的可操作性和有效性

第六章为总结与展望。对本研究的内容进行总结，提出研究过程中存在的不足，并根据不足提出下一步的研究工作。

本研究的框架结构如图 1-1 所示。

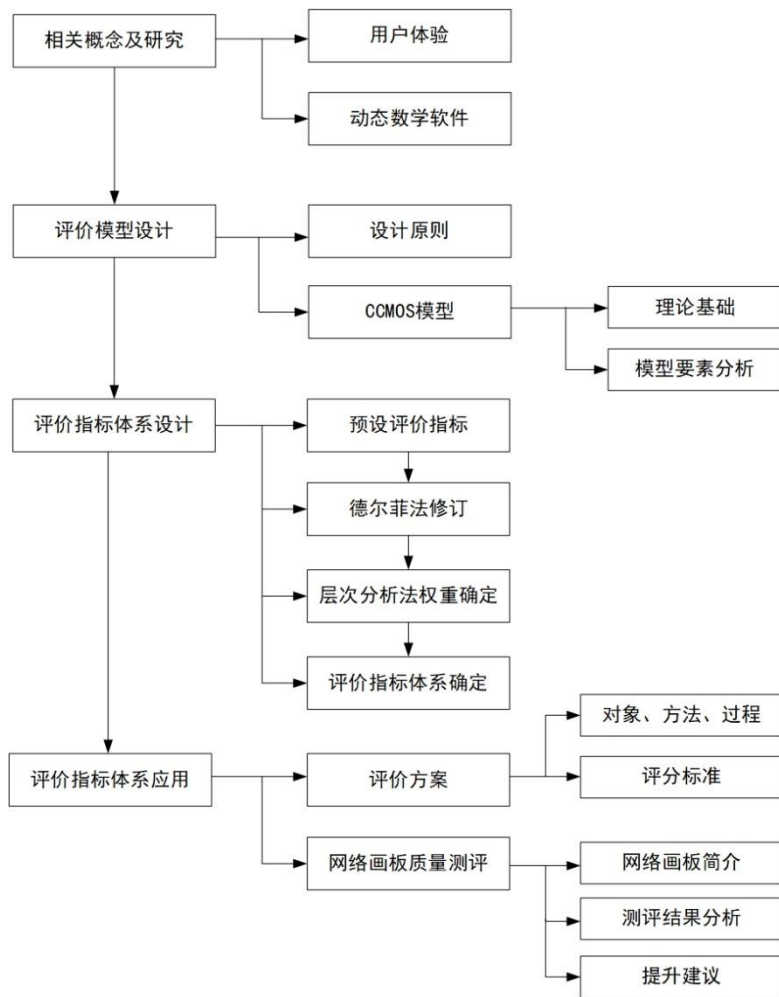


图 1-1 本研究的框架结构图

第二章 相关概念及研究

2.1 用户体验概述

2.1.1 用户体验的定义与构成

近年来,“用户体验”一次是在体验经济的迅速发展下,成为个性化产品和服务中的流行词汇^[11]。产品仅从功能设计出发已不能满足如今市场上大多数客户的需求,更多地重视用户的心理需求,因此以人为中心的用户体验理念逐渐成为产品开发设计不可或缺的因素之一。

用户体验(User Experience, 简称 UE/UX)是指用户在使用某一产品过程中建立起来的一种纯主观感受。“用户体验”一词最早在 20 世纪 90 年代,由美国心理学家唐纳德·诺曼(Donald Norman)提出^[12]。他认为用户体验不等于可用性,印象、可用性、功能性和内容四个因素共同构成了用户体验的概念^[13]。随着用户体验的影响力逐渐增大,许多学者和组织也发表了对用户体验的见解。让·马克(Jean-Marc)认为用户体验是多维的,用户体验是用户在特定环境中与系统交互的整体作用^[14]。哈森扎尔(Hassenzahl)认为用户体验是描述用户在与产品交互过程中和完成后的不断变化的内在情感状态,因此用户体验不应该仅限于某一个阶段,而是贯穿整个使用过程的^[15]。皮特森(Pettersson)等人认为,用户体验已经从简单地确定可用性与产品表现转型为交互上的情感、愉悦,而在到达可用性之后,用户体验将扩展到如美学、刺激性和身份自我实现等高级特性^[16]。可用性专业协会(UPA)给出的定义,将用户体验概括为与产品、服务或者企业交互的所有方面组成的所有用户感知^[17]。目前较具有代表性和权威性的用户体验的定义是国际标准化组织(ISO 9241-210)给出的:人们对于针对使用或期望使用的产品、系统或者服务的所有反应和结果^[18]。

从以上各学者和组织对用户体验的定义可以看出,用户体验主要包括用户、产品以及服务或系统环境三个因素构成。而文献研究表明,大多数文献是根据实际研究的问题来组建用户体验的构成要素。如詹姆斯·加勒特(James Garrett)将用户体验分为用户对品牌特征、信息可用性、功能性、内容性等^[19]。哈森扎尔(Hassenzahl)为了更好理解用户的技术体验,对非技术体验进行区分时特别注意情感因素的作用。他认为非技术特征可分为享受、美学和娱乐三种^[20]。

2.1.2 用户体验的模型

1. 詹姆斯·加勒特用户体验五要素

詹姆斯·加勒特（James Garrett）在《用户体验要素——以用户为中心的产品设计》中提到用户体验要素由“战略层——范围层——结构层——框架层——表现层”五个层面构成^[21]。如图 2-1 所示，整个过程是从下到上、从抽象到具体。最下层是战略层：要求确定用户需求与产品目标，进行产品定位。往上第二层是范围层：包括功能规格与内容需求，主要将需求与目标转化为可操作的方案，并规定产品的范围及优先级。第三层是结构层：是指交互设计与信息架构，即定义用户操作、信息间的关系、合理安置信息内容的骨架。第四层是框架层：主要包括界面设计、导航设计、信息设计，通过优化以及科学合理地设计用户界面，为用户设计最快找到信息的路径，方便用户理解并掌握信息内容。最上层是表现层：通过一系列有规律的视觉符号有效地将信息传达给用户。

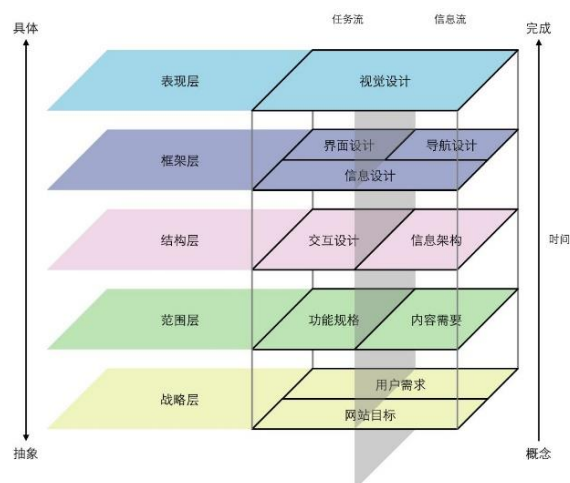


图 2-1 詹姆斯·加勒特用户体验五要素

2. 雅各布·尼尔森用户体验 5E 模型及十大原则

美国“web 易用性大师”雅各布·尼尔森（Jakob Nielsen）认为要使一个产品或服务具有可用性，必须满足一下 5 个维度：有效性（Effective）、效率（Efficient）、吸引（Engaging）、容错（Error tolerant）和易学（Easy to learn），简称 5E 模型^[22]，如图 2-2 所示。

在 5 大维度的基础上，Nielsen 发展了一套沿用至今的用户体验十大原则，该十大交互设计原则作为启发式评估的纲领审视设计产品或服务。原则一：系统状态的可见性。系统要通过及时有效的反馈让用户始终知道当前的状况。原则二：实现系统与真实世界的匹配。系统展示给用户的语句和概念等应该用自然语言而非只有系统能识别的语言，要遵循真实世界的习惯，让信息的表达自然且有逻辑性。原则三：用户的操纵和自由。

在用户操作失误的时候，具有明显的指示“紧急出口”来返回失误前的状态，避免造成用户操作过程中有繁琐的对话，要支持撤销和重复功能。原则四：一致性和标准化。软件的设计要遵循市场中潜移默化的规定和操作习惯，让用户能够更快地适应软件的操作方式。原则五：错误预防。比用户在犯错之后的及时提示更有效的方式是预防错误的发生，软件设计阶段要时刻关注用户可能出现的错误。原则六：认知而不是记忆。让用户对操作方式保持习惯性和长时印象，用户不用去回想对话中的某部分信息，系统可以随时给用户提供指示，且可以轻而易举地追溯到。原则七：灵活性和使用效率。新用户可能用不到的功能，但可以帮助专业用户和系统之间的互动，这样，系统就可以迎合新老用户，要允许用户根据自己的所需设置常用操作。原则八：审美和极简主义设计。用户界面的设计要简单大方，重点突出，无需多余的无用信息。原则九：帮助用户确认、诊断，纠正错误。系统能够直观地指出用户目前的错误，并提供相应的补救措施。原则十：提供必要的帮助文档。为用户提供必要的帮助文档，此类文档应该易检索，放置在软件显眼的位置，针对用户的任务列出执行的主要步骤，注意文档信息重点突出，不繁琐。

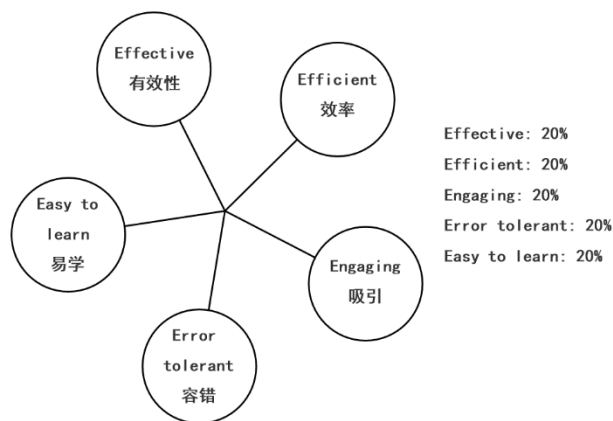


图 2-2 雅各布·尼尔森用户体验 5E 模型

3. 彼得·莫维尔用户体验蜂巢模型

彼得·莫维尔（Peter Morville）是互联网行业知名的信息架构专家，曾被誉为“信息架构之父”，他专注于信息架构、用户体验和可寻性咨询，于 2004 年创建了用户体验蜂巢模型，如图 2-3 所示，将自己的知识体系沿着时代的步伐推进了一个层级^[23]。

用户体验蜂巢模型包含适用的（Useful）、可用的（Usable）、合意的（Desirable）、易查找（Findable）、易访的（Accessible）、可靠的（Credible）和有价值的（Valuable）7 个要素。“适用的”是指必须根据用户需求来设计产品，不能按照设计者的想法天马行空进行软件设计。除此之外，设计者还需要必须勇敢地进行产品和系统的创新，提出

更具有创造力的想法和方案。“可用的”是指功能可以满足用户需求，软件容易使用，但仅仅能够使用不能解决软件设计的所有问题。总之，可用性是必要不充分条件。“合意的”是指情感设计方面用户的态度，产品的图标设计、品牌和形象等都能增加用户的合意性。“易查找”是指设计产品的导航功能，用户可以轻松找到他们需要的东西。“易访的”是指用户能够方便的完成操作，即使是有障碍人士也可通过各种途径无障碍地进行使用。“可靠的”是指能让用户产生信任、影响用户相信和信赖软件的因素。“有价值的”是指软件要给用户带来价值，能够利用软件帮助高效用户完成任务而不是学习软件徒增用户的时间和精力。用户体验的蜂巢模型目前成为产品设计最有效的可参考模型之一。



图 2-3 彼得·莫维尔用户体验蜂巢模型

2.1.3 用户体验的评价

当前，用户体验的评价方法主要包括定性评价和定量评价。在定性评价中，Mahlke 认为用户体验评价方法应包括认知和情感因素两个方面^[24]。Hassenzahl 等认为用户需求、情感及交互产品三个方面是用户体验评价模型的关键因素，并认为产品在美学上的质量能促进用户体验，但是实用性上的质量才是保障产品核心竞争力的关键^[25]。

在定量评价中，主要分为品牌(branding)、可用性(usability)、功能性(functionality)、内容(content) 4 个关键因素。Robert Rubinoff 把用户体验每个元素作为一级指标，进行有针对性的描述和授权重^[26]。根据描述每个一级指标分为 1 至若干个二级指标，并进行二级指标授权，依次进行三级指标甚至更深级的指标。最后，将每级每个指标的权重相加，刚好为 100%，最好的方式是通过一个蜘蛛图来展示。

2.2 动态数学软件概述

计算机辅助教学 (Computer Aided Instruction, 简称 CAI) 是出现于 20 世纪 50 年代末的一种教育技术手段, 它是在教育改革背景下试图在“改变学生学习方式”上有所突破, 对实现教育信息化有重大的意义。目前最常见的 CAI 教学软件可以分为四类: (1) 以多媒体演示为主的呈现学习内容的软件; (2) 交互式教学为主的教学软件; (3) 以辅助学生教学为主的、可自主操作的学习软件 (包含教学内容、知识结构及练习测试的助学软件); (4) 电子资源教学工具等^[27]。动态数学软件作为 CAI 教学软件在数学教学背景的一种产物, 已成为推动教育信息化发展、促进数字化学习应用的重要形式。有研究表明, 利用动态数学软件, 可有效降低学生学习过程中的认知负荷, 提高学习效果^[28]。

2.2.1 动态数学软件的定义

动态数学软件 (Dynamic Mathematics Software, 简称 DMS) 是针对数学学科的专业性教育软件, 其初衷是为数学基础教育的教学提供全面服务, 提供量身定做的学科工具、基本资源和活动平台^[29]。在动态数学软件中, 几何作图是软件中最重要的部分, 动态地拖动几何图形中的自由点来生动地得到几何图形维持约束关系的动态过程, 从而更好的了解几何图形中所蕴含的几何性质, 具备这样特点的系统被称为动态几何^[30]。用动态几何软件作出的图形, 有两个基本的特点, 一是图中的某些对象可以拖动或用参数变化来直接驱动; 二是其他没有被拖动或者直接驱动的几何对象会自动调整其位置, 以保持原来设定的几何性质^[30]。除了几何作图外, 动态数学软件还应具有本文输写、动态测算、逻辑动画、自动推理等功能, 以满足日常的数学教学需求^[31]。

2.2.2 动态数学软件的发展

最早的动态几何软件是美国开发的 Geometry Supposer, 随着网络技术的不断发展, 被美国 Key Curriculum 出版社于 1991 年推出的几何画板 (The Geometer's Sketchpad, 简称 GSP)^[32]快速超越。几何画板的推出旨在改善当时美国学生的数学学习状况, 利用几何画板来增加数学趣味性、直观性、可操作性, 减低几何学习的难度。中国科学院张景中院士团队在面向学科的“智能知识平台”的概念和理论上开发了超级画板, 超级画板在汲取了几何画板的优势, 并结合了常用的 office 办公软件、编程软件、符号运算等多种软件的基本功能, 并在此基础上增加了测算、动画、自动推理等功能。现动态数学软

件全球已有四十几种^[33]，除上述的动态数学软件外，还有 Cabri^[34]、Geogebra^[35]、Cinderella^[36]和网络画板^[37]等。

2.2.3 动态数学软件评价的研究现状

为适应教育信息化和以用户为中心的背景下动态数学软件的评价需求，建立基于用户体验的动态数学软件评价指标体系，分析国内外动态数学软件评价研究现状是十分必要的。

综合可参考的文献发现，国外动态数学软件的评价研究主要有专业的评价组织来进行软件评价的调查和结果的发布等各项工作。他们根据社会需求，建立自己的评价方法和标准，通过网络收集数据、发布评价报告，这类组织有助于个人对数学软件的选择，推动数学软件的发展。

美国数学教师协会(National Council of Teachers of Mathematics，简称 NCTM)是最早涉及评价问题的学术组织，于 1981 年公布了课件评价指南^[38-39]。该评价指南主要从使用者的角度来衡量课件质量^[40]。该协会为教育工作者提供可分类的、易于理解的、有用的课件信息，旨在利用计算机辅助教学的人了解课件评价标准，并可以自主评价课件。

2015 年美国卡罗莱纳海岸大学 Cheng-Yuan Lee 和 Todd Sloan Cherner^[41-42]建立了教学 APPs 的综合评价量规，包括“面向教育”、“技术设计”、“艺术审美”3 个领域以及 24 个评价维度，如表 2-1 所示。其中“面向教育”领域主要以教育学理论为基础，“技术设计”领域主要以用户体验理论为基础，“艺术审美”领域主要以文化心理学为基础。该标价量规涉及范围全面，维度分布均匀，具有较强的参考价值。

表 2-1 教学 APPs 综合评价量规

领域	维度	描述
面向教育	21 世纪技能	分析使用 APP 时的技能类型，评价其是否为 21 世纪、技术增强、现代世界做准备
	连接未来学习	评价 APP 设置的任务中是否有为学习者
	错误价值	评价 APP 如何让学习者在犯错误的同时从经验中学习知识
	教师的反馈	评价 APP 是否能够或如何让教师监控学习者的学习进度
	学习材料的水平	评价 APP 提供的材料是否适合使用人群
	合作学习	评价 APP 是否为学习者提供机会合作完成项目
	个人差异的包容	评价 APP 的设计是否适应广泛的学习者
技术设计	内容的严格性	评价学习者应用 APP 时需要的思维技能
	能够保存进度	评价 APP 能否让学习者保持进度，并在下次打开时回到保存的位置

	平台集成	分析 APP 是否可以将其内容与不同的平台进行连接
	屏幕设计	分析 APP 的文本、图形、视频、声音和语言是否组织良好
	易于使用	评价 APP 直观性和用户友好度
	导航	评价 APP 中学习者是否易于移动使用其内容和选项
	目标导向	评价 APP 的每个组织是否有助于学习者满足自身的教学目标
	信息演示	评价 APP 向学习者呈现信息、增强学习者理解、获得知识的能力
	媒体整合	分析 APP 将不同的媒体组件（例如文本、图形、声音和语言）结合以形成具备凝聚力的程序
	交互性	根据学习者与 APP 积极互动的情况，评价 APP 是否为学习者创建引人入胜的教学体验
艺术审美	美学	评价 APP 的图形和界面的美感
	文化敏感性	评价 APP 适应多样民族和文化背景的能力
	学习者控制	评价 APP 是否允许学习者通过交互材料、选择其参与的内容或路径
	节奏	评价 APP 是否允许学习者控制学习内容呈现（如视频播放）的速度
	个人喜好	评价 APP 是否允许学习者根据个人偏好进行个性化设置
	兴趣	评价 APP 是否可以吸引其目标受众
	实用	评价 APP 提供的学习内容是否可以对学习者的学术、专业和个人生活具有准备作用

可用性测试（Usability Testing）是目前评价软件用户体验较常规的方法，是一种基于实验心理学的经验型评估。过程是让一群具有代表性的用户对产品进行典型操作，同时观察员和开发人员在一旁观察，聆听，做记录^[43]。可用性测试已经成为软件设计开发和改进维护各个阶段必不可少的重要环节。它由于提供了可操作的有效方案，因此可节约设计开发的成本。可用性测试可以在帮助软件找到问题并及时解决，提高软件的效率。通过可用性测试不但可以获知用户对软件的满意程度，还可以获知用户隐藏的行为特征。

对于国内数学软件评价研究，有三个主要研究方向，一是计算机辅助教学软件评价，二是网络多媒体教学资源评价，三是移动学习资源教育价值评价^[44]。

梁平^[38]依据数学学科的 3 个特点：高度的抽象性；严谨的逻辑性；应用的广泛性，结合数学学科的学习理论，参照数学新课程课堂教学评价标准，构建了数学 CAI 课件教学性评价指标和数学 CAI 课件技术性评价指标。该评价指标不仅指出了教学软件的教学功能，而且强调了一个教学软件的技术功能，结合教学和技术两个方面对数学教学软件进行全面、系统、客观的评价，为数学辅助软件提供多方面的意见和建议，促进数学新课程教学的改革。

方海光^[45]对教育软件的重要指标的可用性进行分析和量化,通过定义操作简单率来描述操作方式完成更多功能的度,定义操作量来描述用户操作软件的工作量,从而对教育软件产品用户操作的可用性程度进行表述和呈现,并以超级画板和几何画板的操作实例进行对比测试。

赵文静^[46]根据科学性、完备性、合理性、可操作性、有效性和可比性的原则,确定了以内容维度、教学维度、数学维度、技术维度、艺术维度和发展性维度的 6 个一级指标,以及 43 个二级指标和 33 个三级指标,并进行权重分配,构建了数学教育网站评价指标体系。该评价体系可以在多个维度上指导数学教育网站的设计开发,辅助评价网站在开发测试期是否满足了教学需求以及描述是否已实现教育网站的基本属性。

结合国内外对动态数学软件评价研究的现状,前人在促进动态数学软件质量发展上取得了较大的成就,有了前所未有的进展。但是目前对于动态数学软件的评价多数是基于教学设计、资源设计和功能设计的角度,研究范围窄、研究角度少,缺少基于用户体验的角度,以用户为中心思想的评价模型和体系。为更好提高动态数学软件的用户体验感,有必要从用户体验的角度构建动态数学软件评价体系。

2.3 本章小结

本章主要是对用户体验和动态数学软件等相关定义和理论进行概述,为后续设计与实践工作奠定理论基础。首先对“用户体验”一词进行相关的概述,包括用户体验的定义与构成、用户体验的模型、用户体验的评价,着重分析了用户体验的三个经典模型,为设计基于用户体验的动态数学软件评价模型做参考;然后对动态数学软件进行相关的概述,包括动态数学软件的定义、动态数学软件的发展和动态数学软件评价的研究现状,发现基于用户体验感设计的动态数学软件评价体系研究深度不够,提出本课题研究的必要性。

第三章 动态数学软件评价模型设计

3.1 设计原则

要建立有效的动态数学软件评价模型，需要对动态数学软件进行全面、科学和系统的了解。动态数学软件作为教育软件的一种特殊形式，既要符合一般教育软件的评价模式，又要明确数学学科的教学与其他学科教学的差异性。因此，基于用户体验的角度，在构建动态数学软件评价模型时必须遵循科学性、系统性、可操作性和特殊性原则。

科学性原则主要包括以下 3 个方面。一是评价模型要素要与评价目标一致，要素不能偏离评价主题，要素的确定必须紧紧围绕目标，能反映目标的实质与要求。二是评价模型要素的描述要准确、正确、客观，不宜太直白，用最精炼的语句表达清楚要素的含义。三是所用的信息具有可靠性和权威性，信息必须严谨真实可靠，不可假造数据和信息。

系统性原则是指评价模型各个要素要能反映动态数学软件在各个阶段、各个方面、各个层次的应用价值和水平。各个要素之间既要具有关联性和相容性，要素之间不能有冲突和对立，要互相联系，有交叉性，否则容易造成思维混乱；各要素又要具有独立性，要素不能重复或相似，更不能出现等价意义的要素，否则评价模型不够全面，无形中造成某一因素的比重加重，影响评价的结果。

可操作性原则是指评价模型各要素是可掌握、可观察的，对重要因素的表述是清晰明了，术语规范，所阐述的内容是可以被记录下来的现象和行为表现，而不是抽象的概念。这样既有利于评价人员的记录和判断，又不会造成评价人员繁琐的工作。需要注意的是，根据评价因素收集的信息应该便于工作人员进行分析和量化处理，注意各项信息之间的关联性和相互独立性，避免对立因素产生的相互矛盾的现象或者因素相关性较大而造成这一因素在总占比中上升的现象。

特殊性原则是指在该评价模型在具有普适性的基础上，由于学科差异性而独具的评价因素。本文构建的是动态数学软件的评价模型，因此要遵循数学学科的性质。苏联数学家亚历山大洛夫在《数学——它的内容、方法和意义》^[47]中提出数学学科具有高度的抽象性、严谨的逻辑性和应用的广泛性 3 个特性，所以构建基于用户体验的动态数学软件评价模型还需要考虑数学学科的特性，让模型更具有专用性和针对性。

3.2 理论基础

3.2.1 信息技术与课程整合

信息技术的快速发展有力地提高了社会生产力，社会的信息化必然也涵盖了教育信息化，信息技术与课程整合是实现教育信息化的一个重要途径。何克抗教授认为：“所谓的信息技术与课程的整合，就是通过将信息技术有效地融合于各学科的教学过程来营造一种新型的教学环境，实现一种既能发挥教师主导作用又能充分体现学生主体地位的以‘自主、探究、合作’为特征的教与学方式，从而把学生的主动性、积极性、创造性较充分地发挥出来，使传统的以教师为中心的课堂教学结构发生根本性变革，使学生的创新精神与实践能力的培养真正落到实处^[48]。”从何克抗教授对信息技术与课程整合的定义可以看出，信息技术与课程整合主要是指营造新型的教学环境、实现新的教与学方式、变革传统教学结构 3 个属性^[49-50]。因此，通过信息技术与课程整合，学习者应掌握顺应现在的信息时代，能够利用各种电子资源和数字化平台进行学习，能够在信息化环境中自主探究、合作学习以及创造性学习，产生比传统学习更高的效率。

整合技术的学科教学知识（TPACK）是美国学者科勒（Koehler）和米什拉（Mishra）^[51]于 2005 年为适应信息技术与课程整合趋势下提出的一种模型，强调了技术知识、内容知识和教学知识之间的关系，如图 3-1 所示。技术知识（Technology Knowledge, 简称 TK）是指关于教育技术的知识，主要是用于学科教学的信息技术，在本研究中，主要是指用于数学教育教学的信息技术。教学知识（Pedagogical Knowledge, 简称 PK）是指教学设计和教学实施的深层次知识，包括如何掌握全面的教育价值和目标，如何进行课堂管理、课时计划的发展和实施、学生评价，掌握教学方法、学习者风格、评价学生策略等。内容知识（Content Knowledge, 简称 CK）是指关于所教学科内容的知识。浅层次地，是指教材中的具体学科知识，如事实、核心概念、理论和方法，组织、联系观点的解释框架和证明规则；深层次地，是指不同学科领域的教师在对内容记忆层次上的理解应用和创新探究^[52-53]。这三个关键元素互相结合可以构成四个复合的元素：技术教学知识（Technological Pedagogical Knowledge, 简称 TPK）、技术内容知识（Technological Content Knowledge, 简称 TCK）、教学内容知识（Pedagogical Content Knowledge, 简称 PCK）以及整合技术的学科教学知识

(Technological Pedagogical Content Knowledge, 简称 TPACK)。目前大多数学者一致认为 TPACK 模型有助于提高教师信息技术与学科整合的能力, TPACK 能力成为教师的必备技能。

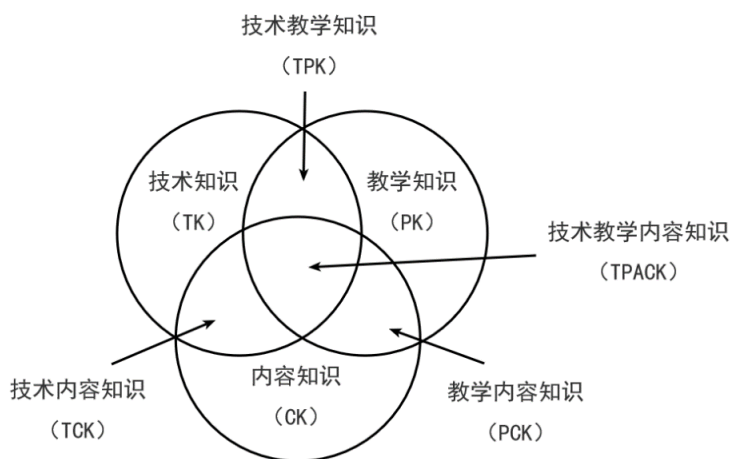


图 3-1 整合技术的学科教学知识 (TPACK) 概念框架

TPACK 模型应该具有以下三个特征。第一, 突出教师的关键性作用, 教师是在应用 TPACK 进行教学改革中积极使用者、教学设计者、组织者和实施者, 在教学过程中教师应起引导和监控作用; 第二, 三种知识要素并不是简单的线性叠加或重合, 而是要将技术融合到具体学科内容教学的教学法知识当中去, 形成新的科学教学知识; 第三, TPACK 模型是整合旧的三种知识形成的新知识, 影响该模型的因素较多, 且影响因子之间互相作用, 因此该模型具有不稳定性, 需要教师在实际的教学场景中灵活运用三种关键知识, 举一反三, 累计教学经验, 做到因教施材。

3.2.2 教学设计理论

教学设计是指依据对学习需求的分析, 设计解决问题的教学方案, 使教育教学绩效得到提升的系统决策过程。一般流程主要包括学习需要分析、学习内容分析、学习目标的阐明、学习者分析、教学策略的制定、教学媒体的选择和利用以及教学设计成果的评价七个环节^[54], 如图 3-2 所示。此模型为传统课堂的教学设计, 更加注重知识的传授和教师的地位, 而忽略了以学习者为中心, 不适合信息技术环境下的教学设计。

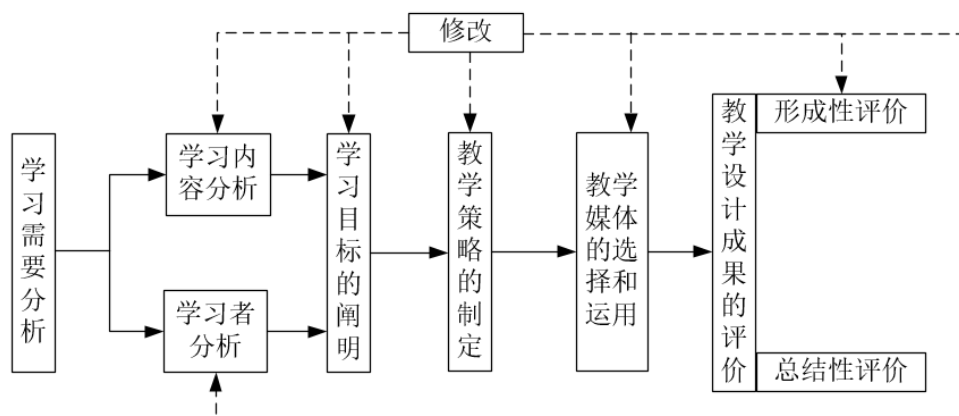


图 3-2 教学设计的一般过程

与传统教学设计相比，信息化教学设计更加注重学习者在信息化环境中的主体作用，首先自主分析学习需求，自定义学习步调和节奏，通过情境设计、活动设计等方式，充分利用信息技术环境和数字化资源，促进教学绩效的提高。主要环节有需求分析、情境设计、技术环境支持、学习服务设计等，如图 3-3 所示。首先需要对学习者需求分析，信息技术下的学习必须满足学习者的特殊需求。继而进行场景设计和迷你活动设计，旨在提高学习的知识和技能，不同的活动需要搭配不同的学习场景。在确定场景完成迷你活动后，需要提供学习者技术环境和学习支持，辅助学习者能更快掌握技术媒体的应用，高效完成学习目标。在提供学习支持中，要注意学习的约束条件，社会性约束主要是指影响学习者交互、协作的外部、内部因素，技术性约束指在技术层面缺少必要的工具或者技能。约束条件会影响最后的学习效果，因此需要进行学习评价，不断改进、完善信息化教学设计的过程。

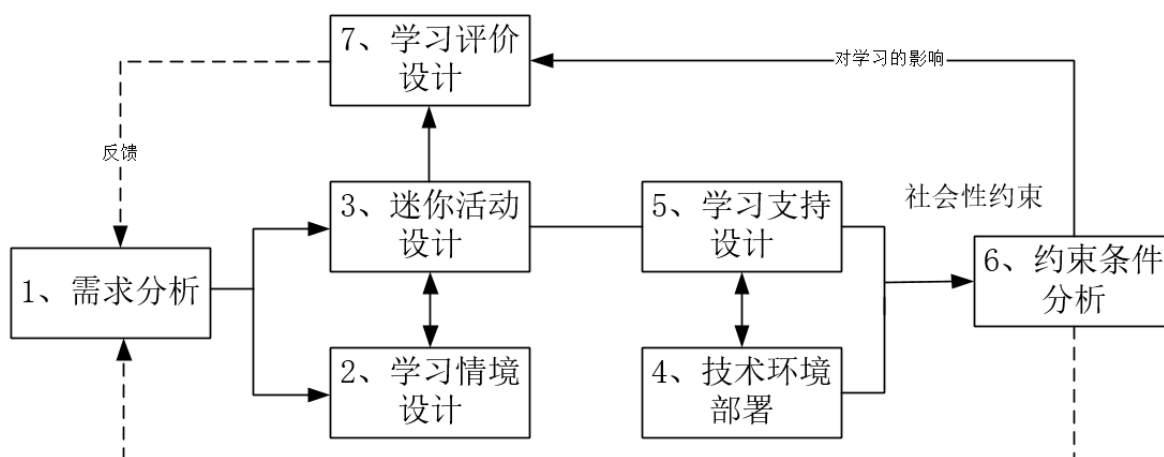


图 3-3 信息化教学设计过程

3.2.3 多媒体学习理论

美国知名教育心理学家和实验心理学家理查德·梅耶为研究不同的多媒体信息呈现方式对学习效果的影响，将多媒体整合于教学中，提出了梅耶多媒体教学设计原理。梅耶认为双重编码理论、工作记忆模型、生成学习理论和认知负荷理论这四大理论是多媒体学习理论的基础^[55]。其中双重编码理论和工作记忆模型为多媒体学习的认知理论构建了关键概念和元素；生成学习理论为多媒体学习的认知理论构建提供了基本的解释性框架；认知负荷理论则以多媒体学习的认知理论为基础，进而为多媒体教学的系列设计原理提供了关键支撑^[56]。依据梅耶的多媒体教学设计原理，通过多媒体信息可视化、促进必要认知加工、减少外来认知加工等信息加工方法，提高多媒体教学软件的信息呈现方式与传递策略，在一定程度上摆脱了教师在对多媒体教学软件进行信息加工时忽视学习者认知机制的现象，对多媒体教学及教学软件的设计与制作具有重要的指导意义。

3.3 动态数学软件 CCEMS 模型分析

从用户体验的角度构建动态数学软件评价，离不开用户体验相关理论的指导。动态数学软件的最终受用者是用户，因此所有的评价指标都应遵循用户体验的基本原则。本研究基于 Nielsen 建立的 5E 模型、提出的十大可用性原则以及 Peter Morville 提出用户体验蜂巢模型，帮助确定动态数学软件评价模型的核心要素。

除借鉴上述用户体验的理论与模型外，信息技术与课程整合的相关理论能科学指导动态数学软件中的学习资源与学习工具的改进；信息化教学设计促进用户在智慧学习环境中高效率学习；多媒体学习理论为优化用户体验提供了理论支持和实践依据，可最大化地实现动态数学软件的精准教学帮扶。

基于前人的研究成果和上述涉及的理论，考虑动态数学软件的教育属性、互联网教学、用户体验等因素，创造性地提出以清晰性（Clarity）、可靠性（Credibility）、高效性（Efficiency）、激励性（Motivation）和学科性（Subject）为核心的 CCEMS 模型，如图 3-4 所示。

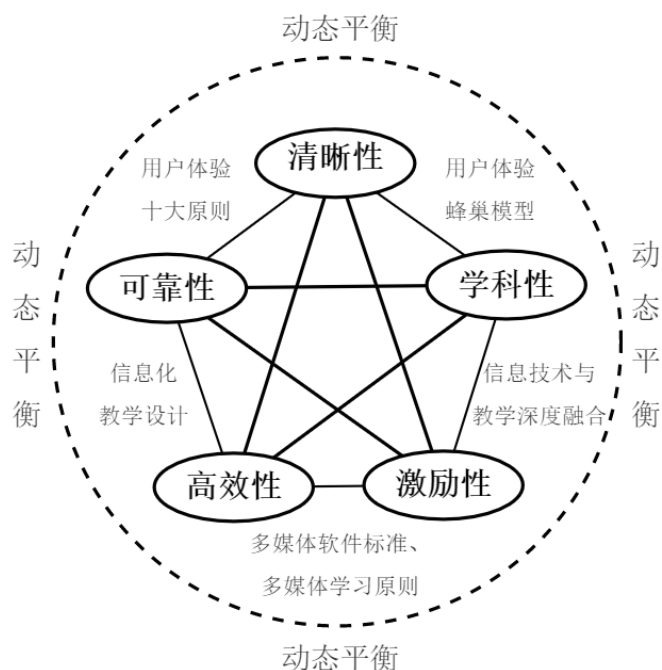


图 3-4 CCEMS 模型

1. 五要素分析

CCEMS 模型以以下 5 个指标来判断动态数学软件的优劣：清晰性，要求动态数学软件的用户界面和内容信息是清晰协调的，用户能够快速获取对于软件的清晰认识，能够把握软件的基本内容和软件的主题风格。可靠性，要求动态数学软件让用户感受到软件交互是安全的、符合预期的；用户在使用过程中是流畅的，能产生对软件的信赖。高效性，即用户完成任务的效率以及软件终端的回应速度；让用户借助简单的操作来快速地、高效地完成任务。激励性，即软件的设计和服务对用户的黏性和忠诚度的影响程度；动态数学软件应为用户提供良好的学习环境和学习资源，为师生提供便利的互动，且有良好的后勤服务，才能提高用户对软件的使用率和愉悦性。学科性，是动态数学软件独有的特性，动态数学软件是信息技术与数学学科整合的一种产物，应该遵循数学学科的教学特点。这一特性区别了数学软件评价体系与其他学科软件评价体系，该评价体系更具有针对性。

这一模型是从用户体验角度和学科角度两方面对动态数学软件进行评价。虽然以“用户为中心”的交互设计思想很重要，但是凸显数学学科的特性才是衡量动态数学软件质量的重点。因此，该模型的核心五要素的重要程度并不是平均分配的，其中学科性区别于其余四要素，其余四要素以“用户体验”为主线，从交互设计的不同角度分类，划分出 4 个属性进行评价，而学科性从数学教育软件的角度出发，根据动态数学软件的功能和特性进行评价，既区别于其他通用教育软件评价体系，彰显了动态数学

软件的学科特征，又使基于用户体验的动态数学软件评价体系更完善，更具科学性和操作性，满足动态数学软件评价的需求。

清晰性主要针对的是界面设计方向，可靠性针对的是软件的可用程度和安全性，这两个要素是从交互角度出发，是基于用户体验软件评价的基础属性，是用户在使用产品时直接感受到的信息。而高效性和激励性是在清晰性和可靠性基础上产生的用户体验属性，是在情感角度评价软件质量，高效性关注软件的反馈速度和用户完成任务的效率，旨在提升用户的完成效率，激励性则要提高用户的使用频率，增强友好性，是推动产品的销量和利益的手段。五要素之间的关系如图 3-5 所示。

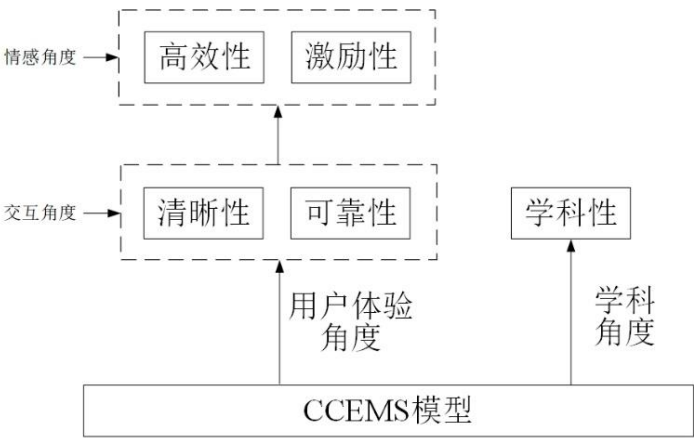


图 3-5 五要素关系图

因此，五个要素之间是互相影响，相互作用的，基于用户体验的动态数学软件评价模型对指标体系的建立具有重要的指导作用，既要考虑到五要素之间的联系，又要注意各要素之间的独立特征和差别，确保后续评价指标体系建立的完整性和科学性。

2. 动态平衡

CCEMS 模型的五个核心要素和指导理论不是孤立存在的，而是强调各个理论和各个要素之间互相交互融合，维持一种动态平衡的状态。如何维持动态平衡的关键是从关注软件的功能技术转向关注数学教学与信息技术的深度融合，因此，五个核心要素的重要性各有不同，各要素和个理论之间应该互融互通、互相联系，确保该评价模型的完整性及软件的技术支持教学。

3.4 本章小结

本章主要介绍了构建基于用户体验的动态数学软件评价模型的过程。首先介绍了构建评价模型需要遵循的四大原则：科学性、系统性、可操作性和特殊性原则，为模

型的构建提供科学的依据。其次，对信息技术与课程整合、教学设计理论、多媒体学习理论进行了综述，为模型的构建奠定教学理论基础。最后，结合用户体验 5E 模型和蜂巢模型以及上述教学理论，构建了 CCEMS 模型。

第四章 动态数学软件评价指标体系设计

4.1 预设评价指标设计

根据第三章构建的基于用户体验的动态数学软件 CCEMS 评价模型，将模型中的五大核心要素（清晰性、可靠性、高效性、激励性和学科性）作为动态数学软件评价体系的一级指标进行设计。

4.1.1 指标设计

1. 清晰性

清晰性能影响用户对软件的第一印象，是不可或缺的要素之一。清晰性的二级指标主要包括布局清晰性、内容清晰性和结构清晰性三个方面。

布局清晰性主要涉及的是动态数学软件的界面设计以及视觉风格要符合产品的定位和用户的习惯。界面清晰简洁重点突出，板块与板块、图片与背景风格统一、位置和谐；有明显的菜单栏、工具栏、画布和可移动区域等；软件的整体色调要简约一致，市场上大多数软件以绿色、蓝色、白色为主要色调，为制造宁静、祥和的学习环境，因此动态数学软件不宜有太多跳跃的色彩，要以简约为主；巧用色彩搭配对进行视觉对比，凸显对象的状态和关系，动态数学软件的操作对象状态和关系多种多样，开发者应该利用色彩对比告知用户操作对象的状态；功能的配图与其作用一致，如智能画笔的作用是快速帮助用户画出点线圆等几何图形，智能画笔工具的图片可为一只发光的笔表示其智能性。

内容清晰性主要是指动态数学软件对数学学科的资源、信息和知识进行组织和利用，主要包括软件的通用功能和内容以及基于数学科学的专业功能和内容。用户对软件板块作用、每个元素的含义和作用清晰了解，能正确理解软件提供的对功能的表述和帮助信息，如用户鼠标选择了迭代功能，鼠标右侧应出现对迭代的解释和操作步骤；在内容的设计上，既要有通用教育软件的功能，如个人空间、资源库等，又要有动态数学软件的专业功能，如画板、作图工具、自动推理等，两种功能在内容的布局上应合理分配、互不冲突。相关的研究表明，内容丰富的软件反而起不到很好的学习效果，“少即是多”和“简洁就是力量的”设计理念能够有效帮助用户理解动态数学软件的功能作用。

结构清晰性主要是指动态数学软件的信息架构和交互流程，软件页面和功能之间的主次关系清晰。菜单栏和工具栏的分类以及每一类的下属是合理的；用户能理解在点击使用改页面或功能之后，下一步能进行哪些操作、如何返回或更改上一步操作。如用户想做出图形的迭代，选择迭代原象后应自动跳出界面供用户编辑每个原象对应的映象、迭代深度和停止条件等。

2. 可靠性

可靠性展现动态数学软件的权威性和价值，帮助用户高效完成任务，增加用户对软件的信任度，是体现动态数学软件品牌价值的要素之一。可靠性的二级指标主要包括可控性、容错性两个方面。

可控性是指用户对动态数学软件的控制程度和操作程度。用户能够根据自己的需求来控制软件板块内元素的放置位置；在正确的操作后能得到满意的成果，且可以对成果按照需求修改。如用户可以自主设置可移动区域在界面上的位置；用户正确选择了画指定半径的圆，结果应对应出现在画布，且用户可以进行数据修改。

容错性是指动态数学软件能减少用户犯错次数，及时反馈并快速恢复正常状态。保护用户的注意力，避免重要的错误；判断用户出现错误的原因并及时提醒，修改后可恢复至出错前状态。如可通过文字提醒提前告知用户正确使用功能的正确步骤，如出现错误，及时反馈，保证用户得到满意的结果。

3. 高效性

高效性可以帮助用户快速地完成任务，是用户体验重要的评价指标之一。高效性的二级指标包括易学性、快捷性和即时性三个方面。

易学性和软件如何支持初次使用和更深度的学习相关。用户初次使用通过帮组文档或教学视频能快速掌握动态数学软件的功能和工具的作用，并能进行简单操作；用户之后的每一次使用，动态数学软件必须能帮助用户记忆或重新学习，减小使用负荷，形成内在的使用习惯和长期的学习记忆，且多次使用后能够发掘更多的功能。

快捷性指通过简单的分类和过滤有规律地呈现大量复杂的内容。比如设置功能快捷键；通过贴心的工具设计和常用工具的设计大大简化用户的工作量。可以从三方面进行考虑：减少选择负担、减少导航负担、减少重复步骤。一是减少选择负担，动态数学软件的核心功能是绘制动态几何图形，在这个过程中，用户不断进行作图工具的切换，这不仅增加了用户负担，还容易出现误操作情况。二是减少导航负担，交互界面有限，因此，如何改善导航交互尤为重要，需遵循“少就是多”设计理念。三是减少

重复步骤，作图是动态数学软件常用的功能，常常会出现对相同的作图步骤进行重复，减少重复的操作有利于提高交互效率。

即时性指用户能即时感知状态和过程。通过界面的设计和视觉传达，用户能依据提供的即时信息掌控动态数学软件此时的状态，任务完成进度和下一步的工作；为适应碎片化学习，在各种切换和退出返回时，具有恢复现场工作状态的能力。

4. 激励性

激励性不仅表现在用户对动态数学软件的满意程度，还包括了软件管理者提供的可增加用户黏度的服务，是推动动态数学软件长远发展的因素之一。激励性的二级指标主要包括趣味性、良好的服务和互动便利三个方面。

趣味性指用户在使用动态数学软件过程中是顺利的、愉悦的、感到实用的，能提高用户对软件的使用率和忠诚度。教师运用动态数学软件与数学学科深度融合，解决教学重难点和提高教学质量，学生使用软件进行学习和作品创作，利于理解数学知识和提高数学思维。不仅可以通过提高软件的交互友好性来增加软件的趣味性，还可以增加软件的个性化服务，根据用户需求和教育技术发展来预测动态数学软件的变化趋势，不断扩展和完善软件。

良好的服务是开发者对用户提供服务的一系列保护措施和个性化服务。对注册用户的信息进行保密，创建隐私和数据安全功能；定期更新版本，上新资源、修复问题、优化界面、增加功能；支持对学习资源的自主管理，能保存、修改、分类、加密个人资源，同时也能评论、收藏、下载他人的资源；具有准确度较高的检索功能，通过检索用户可快速达成任务和目的；分析用户的学习习惯并根据用户的等级推荐相应的工具、软件功能和资源；为用户提供专属工具，定制专属资源包；支持软件的离线下载、在线帮助、在线客服、及时更新等服务；教学资源与 PowerPoint 无缝对接、轻松组装多个资源。

互动便利是指用户与用户、用户与开发者、用户与资源之间的交互交流。良好的互动可增加用户对软件的使用频率和学习成就感，提升学习者的学习体验。提升软件互动的方式有优质资源即时分享，减小用户的工作负担，提高解决问题的效率；建立在线交流或论坛，为师生之间、生生之间提供便利的交流、互动，进行在线答疑；建立网络社群，方便不同类型的用户及时沟通；建立互联网数学实验室及专属实验网站，为学校提供新的数学教学方案。

5. 学科性

我国数学教育家张景中院士认为信息技术只有深入学科才能真正发挥其作用^[57]。动态数学软件的学科性使其区别于其他教育软件，并使数学与信息技术密不可分。动态数学软件学科性的二级指标包括动态性、直观性和专业性三个方面，如图 4-1 所示。

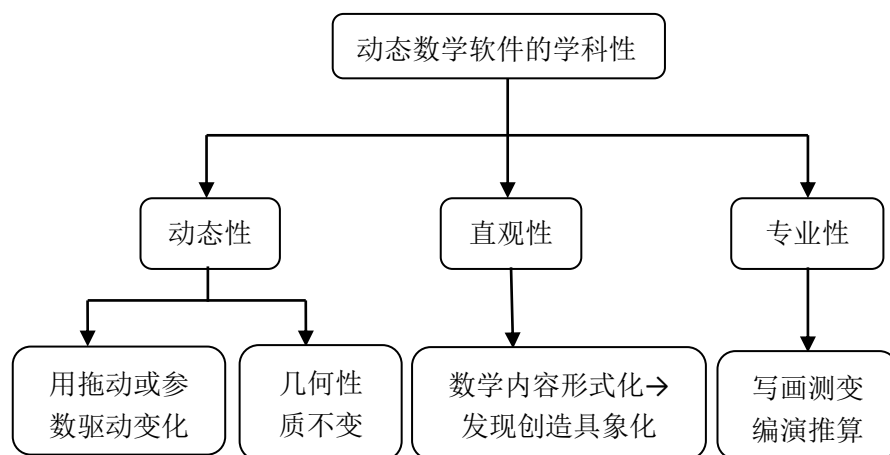


图 4-1 动态数学软件的学科性

动态性是指动态数学软件中变量与不变量之间的关系。数学中充满了“变”，但却是研究变化中的不变量和不变性^[58]。教育中的变异理论认为，认识一个事物的本质必须了解这一事物与其他事物在某个关键属性上的差异，只有保持这一关键属性某个维度变化而其他维度不变，才能认识到这一事物的本质，其主要运用的是控制变量法。动态数学软件能将几何操作对象的形态通过鼠标拖动或参数进行变化，但是保持对象的几何性质不变，凸显了数学变中有不变的特性，将它称为动态性。除此之外，动态数学软件利用计算机将动态视觉图象与抽象数学符号结合，是常规的黑板操作难以实现的。

直观性指动态数学软件能帮助用户将抽象的数学问题具象化。波利亚曾指出，形成过程中的数学看上去是一种实验性的归纳科学，形成后的数学看上去是以欧几里得方式表现出来的一种系统演绎科学^[59]。数学具有双重性，数学教学要在学习中教给学生形式化、抽象化的数学内容知识，又要让学生深刻体会具体化、经验化的数学发现和创造过程^[60]。运用动态数学软件展示数学问题，能使抽象的数学问题具体化、模型化、直观化，让学习者先从视觉上和逻辑上得出结论，克服抽象思维水平的局限，这有助于进一步学习抽象数学知识，帮助激发想象、发现数学规律、印证数学猜想、诱发直觉思维、揭示数学本质。如动态展示几何图形、函数图像、数学抽象概念的变化过程；直观展示代数的运算过程、数学实验、数据生成过程和数学逻辑推理的过程演

示；使几何对象状态和关系的可视化；提供作图的文字提示等。

专业性指动态数学软件独有的数学功能。动态数学软件是针对数学学科的专业性教育软件，其初衷是为数学基础教育的教学全面的服务，提供量身定做的学科工具、基本资源和活动平台^[29]。张景中院士认为动态数学软件应具备的以下八大功能：写画测变，编演推算。“写”即写文本，写公式。“画”即画几何图形、函数图象、坐标曲线、图表等。“测”即动态测量图形中几何量和表达式的值，且测量出来的数据随图形变化而变化。“变”即图形能够随条件和参数变化，对图形可以做平移、旋转、跟踪等几何变换。“编”即可在动态数学软件进行编写程序和运行程序。“演”即在课堂上演示课件讲稿、几何图形的变化过程等。“推”即具有几何自动推理和三角公式交互推演的功能。“算”即可提供动态数值计算、大整数计算和符号计算。八大功能体现了动态数学软件的专业性，既满足了用户在立体几何方面的需求，又解决了在代数计算和自动推理方面的问题。

4.1.2 预设评价指标体系

基于上述动态数学软件评价体系一级指标的内涵与范畴，结合文献调查中对相关软件评价体系中二级指标的汇总和分类，并针对动态数学软件的特性，得到了 14 个二级指标，最终构建了基于用户体验的动态数学软件预设评价指标体系，如表 4-1 所示。

表 4-1 基于用户体验的动态数学软件预设评价指标体系

一级指标	二级指标	评价标准
清晰性	布局清晰性	界面设计以及视觉风格要符合产品的定位和用户的习惯，界面清晰简洁重点突出，风格一致
	内容清晰性	资源、内容和信息的呈现形式清晰明确，分配合理，互不冲突
	结构清晰性	软件的信息架构和交互流程逻辑清晰，软件页面和功能之间的主次关系明显
可靠性	可控性	可根据用户需求对软件进行不同程度的设置和操作
	容错性	减少用户犯错次数，及时反馈并快速恢复正常状态
高效性	易学性	帮助初次使用用户快速操作软件，并减小长期使用用户的记忆负荷，使软件轻松上手
	快捷性	通过减少选择负担、减少导航负担、减少重复步骤来提高软件的工作效率
	即时性	通过适当的反馈，始终让用户知道当前的状况，明确下一步的工作任务
激励性	趣味性	在使用软件过程中是顺利的、愉悦的、感到实用的，能提高

		用户对软件的使用率和忠诚度
	良好的服务	对用户所提供的一系列个人信息的保护措施和个性化服务
	互动便利	具有良好、高效、及时的沟通平台快速解决用户问题，增加不同类型的用户、用户与开发者、用户与资源之间的互动
学科性	动态性	动态地展现几何图形中变量与不变量之间的关系，帮助用户理解几何性质
	直观性	直观展示抽象的数学问题，用户通过观察就能了解动态逼近的数学本质
	专业性	具有“写画测变，编演推算”八大独有的数学功能

4.2 评价指标专家修订

德尔菲法也叫专家调查法，最早于 1946 年美国兰德公司发明，大致过程为进行至少两轮匿名、单独的专家意见回收，而后进行整理、归纳、统计，直至得到一致的意见。在这过程中，各位专家之间需要匿名和独立思考是该方法的关键，这样专家才能从不同的角度给出相对客观的结果，提高评价的效果和效率。

在本次研究中，根据可参考的文献和前人构建的基于用户体验的评价模型和体系，并结合动态数学软件的学科特性，初步构建了基于动态数学软件的预设评价指标体系。但是，由于个人知识水平和学科经验有限，且该评价指标体系存在较大的局限性和主观性，为提升该评价指标体系的科学性和客观性，需要利用德尔菲法对预设评价指标习题进行修改和完善，从而得到质量较高的评价指标体系。本次将邀请 6 位广州大学教育技术学相关领域的指导专家以及成都景中公司技术管理总监形成专家评定小组，对该评价指标体系给出意见和判断。

4.2.1 第一轮专家指导与修订

在基于用户体验的动态数学软件评价指标体系的基础上，形成第一轮专家评定的调查问卷：“基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家评定问卷（第一轮）”

（详见附录一）。问卷共分为两部分：

第一部分是说明本次研究的主要内容和问卷目的，并阐述该问卷的评定的填写方式，最后承诺保密并表达谢意；

第二部分是问卷的主要内容：基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家修改表。采用专家匿名、专家之间相互独立的方式，对预设评价体系的一级指标、二级指标进行判断并提出修改意见。专家根据对各指标的描述进行评价，在“合理”、“修改

后合理”和“不合理”中进行选择。“合理”表示该指标及其评价标准的描述非常准确，不用进行修改；“修改后合理”表示该指标及其评价标准的描述有必要进行保留，但是准确度不够，需要进行修改完善；“不合理”表示该指标及其评价标准的描述没有必要保留，应当删除。对于“修改后合理”及“不合理”的指标，应在“修改意见”提出对该指标及其评价标准的描述的建议和看法，最后，可在“其他修改意见”提出对评价指标体系的整体意见或者其他建设性的建议。

在完成问卷的设计和制作后，以纸质问卷或者电子问卷的形式向 6 位广州大学和成都景中公司的专家发放问卷，回收问卷 6 份，有效问卷 6 份，回收率 100%。

对 6 份回收问卷进行分析和整理，将评价选项“合理”、“修改后合理”和“不合理”进行量化处理。其中“合理”记为 3 分，“修改后合理”记为 2 分，“不合理”记为 1 分。根据此规则，统计出了评价指标体系二级指标的得分平均数和标准差，并汇总了个专家的修改意见，详见表 4-2。

表 4-2 第一轮专家评定意见汇总表

一级指标	二级指标	平均分	标准差	修改意见
清晰性	布局清晰性	3	0	
	内容清晰性	2.83	0.37	
	结构清晰性	2.67	0.47	“软件页面与功能”描述不专业，建议修改为“页面与页面之间”
可靠性	可控性	2.67	0.47	名称改为“操作性”
	容错性	3	0	
高效性	易学性	3	0	
	快捷性	2.87	0.37	
	即时性	2.87	0.37	“适当的反馈”描述太抽象，应改为“相应速度”
激励性	趣味性	3	0	
	良好的服务	2.87	0.37	名称改为“服务性”，不仅是对个人信息的保密性和个性化服务，开发者还应增强对软件的维护
	互动便利	2.87	0.37	名称改为“交互性”
学科性	动态性	3	0	
	直观性	3	0	
	专业性	2.67	0.47	软件要根据自身的定位对八大功能的重要程度做出不同的调整
其他修改意见	将一级指标“可靠性”改为“可用性”； 一级指标“可用性”下增加“注册、安装体验”二级指标，衡量软件的安装便捷度、软件的注册流畅性和注册渠道。			

根据第一轮专家评定意见对评价指标体系的二级指标进行修订、删减和增加，并

对指标评价标准的描述进行修改和完善，得到了第一轮专家评定后基于用户体验的动态数学软件评价指标体系初稿，详见表 4-3。

表 4-3 第一轮专家评定后基于用户体验的动态数学软件评价指标体系初稿

一级指标	二级指标	评价标准
清晰性	布局清晰性	界面设计以及视觉风格要符合产品的定位和用户的习惯，界面清晰简洁重点突出，风格一致
	内容清晰性	资源、内容和信息的呈现形式清晰明确，分配合理，互不冲突
	结构清晰性	软件的信息架构和交互流程逻辑清晰，页面之间的跳转是符合常理思维的
可用性	操作性	可根据用户需求对软件进行不同程度的设置和操作
	容错性	减少用户犯错次数，及时反馈并快速恢复正常状态
	安装注册体验	能快速找到软件的安装链接，安装过程是快捷的，在网络状态可免安装；软件的注册是流畅的，注册渠道多样
高效性	易学性	帮助初次使用用户快速操作软件，减小长期使用用户的记忆负荷，使软件轻松上手
	快捷性	通过减少选择负担、减少导航负担、减少重复步骤来提高软件的工作效率
	即时性	提高软件的响应速度，减少用户的等待时间，始终让用户知道当前的状况，明确下一步的工作任务
激励性	趣味性	在使用软件过程中是顺利的、愉悦的、感到实用的，能提高用户对软件的使用率和忠诚度
	服务性	对用户所提供的一系列个人信息的保护措施和个性化服务，并增强软件的后期维护
	交互性	具有良好、高效、及时的沟通平台快速解决用户问题，增加不同类型的用户、用户与开发者、用户与资源之间的互动
学科性	动态性	动态地展现几何图形中变量与不变量之间的关系，帮助用户理解几何性质
	直观性	直观展示抽象的数学问题，用户通过观察就能了解动态逼近的数学本质
	专业性	根据软件不同的功能定位调整“写画测变，编演推算”八大独有的数学功能在软件中的重要程度和操作深度

4.2.2 第二轮专家指导与修订

基于第一轮专家评定调查问卷，形成第二轮专家评定调查问卷：“基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家评定问卷（第二轮）”（详见附录二）。问卷共分为三部分：

第一部分是说明本次研究的主要内容和问卷目的，并阐述该问卷的评定的填写方式，

最后承诺保密并表达谢意；

第二部分是根据第一轮专家评定意见对评价指标体系进行修改和完善后，形成的专家指导评价指标修改完善情况汇总，为第二轮专家评定调查问卷做准备。

第三部分是问卷的主要内容：基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家修改表。采用专家匿名、专家之间相互独立的方式，对预设评价体系的一级指标、二级指标进行判断并提出修改意见。专家根据对各指标的描述进行评价，在“合理”、“修改后合理”和“不合理”中进行选择。并对不够准确的指标和整体评价指标体系提出修改意见、建议和自身的看法。

在完成问卷的设计和制作后，以纸质问卷或者电子问卷的形式向 6 位广州大学和成都景中公司的专家发放问卷，回收问卷 6 份，有效问卷 6 份，回收率 100%。

对 6 份回收问卷进行分析和整理，将评价选项“合理”、“修改后合理”和“不合理”进行量化处理。其中“合理”记为 3 分，“修改后合理”记为 2 分，“不合理”记为 1 分。根据此规则，统计出了评价指标体系二级指标的得分平均数和标准差，并汇总了个专家的修改意见，详见表 4-4（只列出有修改意见的指标）。

表 4-4 第二轮专家评定意见汇总

一级指标	二级指标	平均分	标准差	修改意见
清晰性	内容清晰性	2.67	0.47	资源、内容和信息之间有重合，建议修改表述
可用性	注册安装体验	2.87	0.37	移到“操作性”上，形成具有由浅至深的逻辑思维
高效性	易学性	2.87	0.37	利用视觉提示、文字提示等方式增强信息反馈
激励性	交互性	2.87	0.37	用户不仅是和资源之间交互，而是和软件之间进行交互
其他修改意见	评价指标的名称和对评价标准的描述应在表述格式上尽量做到统一			

根据第二轮专家评定意见对评价指标体系的二级指标进行修订、删减和增加，并对指标评价标准的描述进行修改和完善，形成了 5 个一级指标、15 个二级指标的基于用户体验的动态数学软件评价指标体系终稿，详见表 4-5。

表 4-5 基于用户体验的动态数学软件评价指标体系终稿

一级指标	二级指标	评价标准
清晰性	布局清晰性	界面设计以及视觉风格要符合产品的定位和用户的习惯，界面清晰简洁重点突出，风格一致
	内容清晰性	内容和信息的呈现形式清晰明确，主题突出，分配合理，互不冲突，元素内容要与功能紧密结合

	结构清晰性	软件的信息架构和交互流程逻辑清晰，页面之间的跳转是符合常理思维的
可用性	安装注册体验	能快速找到软件的安装链接，安装过程是快捷的，在网络状态可免安装；软件的注册是流畅的，注册渠道多样
	操作性	可根据用户需求对软件进行不同程度的设置和操作
	容错性	减少用户犯错次数，及时反馈并快速恢复正常状态
高效性	易学性	帮助初次使用用户快速操作软件，减小长期使用用户的记忆负荷，使软件轻松上手，利用视觉提示、文字提示等方式增强信息反馈
	快捷性	通过减少选择负担、减少导航负担、减少重复步骤来提高软件的工作效率
	即时性	提高软件的响应速度，减少用户的等待时间，始终让用户知道当前的状况，明确下一步的工作任务
激励性	趣味性	在使用软件过程中是顺利的、愉悦的、感到实用的，能提高用户对软件的使用率和忠诚度
	服务性	对用户提供的系列个人信息的保护措施和个性化服务，并增强软件的后期维护
	交互性	具有良好、高效、及时的沟通平台快速解决用户问题，增加不同类型的用户、用户与开发者、用户与软件之间的交流互动
学科性	动态性	动态地展现几何图形中变量与不变量之间的关系，帮助用户理解几何性质
	直观性	直观展示抽象的数学问题，用户通过观察就能了解动态逼近的数学本质
	专业性	根据软件不同的功能定位调整“写画测变，编演推算”八大独有的数学功能在软件中的重要程度和操作深度

4.3 评价体系指标权重确定

层次分析法（简称 AHP）是通过建立两两因素之间的重要性判断矩阵来建立评价指标的权重值，是一种将定量分析与定性分析相结合的方法，因其有效性、高效性、可靠性和实用性而广泛应用于指标权重的确立。本研究邀请了广州大学和成都景中公司的 6 位动态数学软件相关专业专家、技术总监和研究生，对各因素的重要程度进行打分，利用 AHP 计算出评价指标体系的各权重值。

4.3.1 建立判断矩阵

根据经专家指导构建的基于用户体验的动态数学软件评价指标体系的多级指标，请专家对同级指标按斯塔相对重要性程度等级（详见表 4-6）进行两两比较和赋值，形成判断矩阵。

表 4-6 斯塔相对重要性程度等级

相对重要程度	定义	说明
1	同等重要	两者对所属测评目标贡献相等
3	略为重要	据经验一个比另一个测评的结果稍为重要
5	基本重要或高度重要	据经验一个比另一个测评的结果更为重要
7	确实重要	一个比另一个测评的结果更为重要，其优势已为实践证明
9	绝对重要	明显重要程度可以断言为最高
2,4,6,8	以上两相邻程度中间值	需要折中时采取
倒数	次要	元素 i 与 j 的重要性之比为 a_{ij} ，那么元素 j 与 i 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

以某位专家的评分为例，一级指标包括清晰性（A1）、可靠性（A2）、高效性（A3）、激励性（A4）、学科性（A5）5个指标，这位专家认为：A1与A2相比同等重要，A1与A3相比稍微重要，A1与A4相比稍微次要，A1与A5相比稍微次要；A2与A3相比稍微次要，A2与A4相比稍微重要，A2与A5相比稍微次要；A3与A4相比同等重要，A3与A5相比同等重要；A4与A5相比同等重要。按相对重要性等级表将对应等级填入表4-7。

表 4-7 一级指标相对重要性等级表

	清晰性 (A1)	可用性 (A2)	高效性 (A3)	激励性 (A4)	学科性 (A5)
清晰性 (A1)	1	1	3	1/3	1/3
可用性 (A2)	1	1	1/3	3	1/3
高效性 (A3)	1/3	3	1	1	1
激励性 (A4)	3	1/3	1	1	1
学科性 (A5)	3	3	1	1	1

由此可得一级指标的判断矩阵：
$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/3 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

用符号来表示该矩阵：
$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix}$$

这种矩阵为 n 阶矩阵，矩阵的对角线元素 A_{ij} 与 A_{ji} 互为倒数。将专家意见进行汇总统一后，运用上述方法，分别得出一级指标的判断矩阵 A ，以及各一级指标下二级指标的判断矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 。

$$\text{一级指标的判断矩阵: } A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/3 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{一级指标“清晰性”下的二级指标判断矩阵: } A1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{一级指标“可用性”下的二级指标判断矩阵: } A2 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{一级指标“高效性”下的二级指标判断矩阵: } A3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{一级指标“激励性”下的二级指标判断矩阵: } A4 = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{一级指标“学科性”下的二级指标判断矩阵: } A5 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

4.3.2 层次单排序及一致性检验

层次单排序, 就是根据建立的判断矩阵计算本层次各指标的权重值^[61]。以一级指标为例, 首先计算判断矩阵 A 各行相对重要性等级之和以及所有等级之和, 计算公式为:

$$V_n = \sum_{j=1}^n b_{nj} \quad (4-1)$$

$$\text{由公式 (4-1) 得出矩阵 } A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/3 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \text{ 各行相对重要性等级之}$$

和为:

$$V_1 = 1 + 1 + 3 + 1/3 + 1/3 \approx 5.67$$

$$V_2 = 1 + 1 + 1/3 + 3 + 1/3 \approx 5.67$$

$$V_3 = 1/3 + 3 + 1 + 1 + 1 \approx 6.33$$

$$V_4 = 3 + 1/3 + 1 + 1 + 1 \approx 6.33$$

$$V_5 = 3 + 3 + 1 + 1 + 1 = 9.00$$

所有等级之和为:

$$\sum_{i=1}^n V_i = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 = 5.67 + 5.67 + 6.33 + 6.33 + 9.00 = 33.00$$

权重的计算方法是各指标权重等于判断矩阵中各行相对重要性等级之和除以所有行的相对重要性等级之和^[61]，计算公式为：

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (4-2)$$

$$W = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix}$$

由公式（4-2）得出 5 个一级指标的权重分别为：

$$W1 = \frac{5.67}{33.00} \approx 0.17$$

$$W2 = \frac{5.67}{33.00} \approx 0.17$$

$$W3 = \frac{6.33}{33.00} \approx 0.19$$

$$W4 = \frac{6.33}{33.00} \approx 0.19$$

$$W5 = \frac{9.00}{33.00} \approx 0.28$$

$$W = \begin{pmatrix} 0.17 \\ 0.17 \\ 0.19 \\ 0.19 \\ 0.28 \end{pmatrix}$$

由于专家之间存在认知差异，得出的判断矩阵存在一定程度的不一致性，因此需要对此矩阵进行一致性检验，考察矩阵的偏差程度是否在允许范围内。使用随机—一致性比值进行一致性检验，计算公式为：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4-3)$$

公式（4-3）中，CR 表示随机一致性比值，CI 表示一致性指标，RI 表示平均随机一致性指标（平均随机一致性指标 RI 标准值表详见表 4-8）。当 $CR \leq 0.1$ 时，可认为判断矩阵具有一致性，即层次单排序有效^[61]；否则，认为判断矩阵偏差较大，需对评分结果进行修改，直至达到允许范围内。

表 4-8 平均随机一致性指标 RI 标准值表

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

一致性指标 CI 的计算公式为：

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4-4)$$

其中, λ_{max} 表示该判断矩阵的最大特征根, n 表示该判断矩阵的阶数。当 $CI=0$ 时, 表示该判断矩阵具有完全一致性; CI 越大, 判断矩阵的一致性越差。

最大特征根 λ_{max} 的计算公式为:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} \quad (4-5)$$

利用上述公式 (4-3)、公式 (4-4) 和公式 (4-5) 计算一级指标判断矩阵的随机一致性比值:

$$AW = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/3 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.17 \\ 0.17 \\ 0.19 \\ 0.19 \\ 0.28 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 \times 0.17 & 1 \times 0.17 & 3 \times 0.19 & 1/3 \times 0.19 & 1/3 \times 0.28 \\ 1 \times 0.17 & 1 \times 0.17 & 1/3 \times 0.19 & 3 \times 0.19 & 1/3 \times 0.28 \\ 1/3 \times 0.17 & 3 \times 0.17 & 1 \times 0.19 & 1 \times 0.19 & 1 \times 0.28 \\ 3 \times 0.17 & 1/3 \times 0.17 & 1 \times 0.19 & 1 \times 0.19 & 1 \times 0.28 \\ 3 \times 0.17 & 3 \times 0.17 & 1 \times 0.19 & 1 \times 0.19 & 1 \times 0.28 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.07 \\ 1.07 \\ 1.23 \\ 1.23 \\ 1.68 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{5} \times \left(\frac{1.07}{0.17} + \frac{1.07}{0.17} + \frac{1.23}{0.19} + \frac{1.23}{0.19} + \frac{1.68}{0.28} \right) \approx 5.30$$

$$CI = \frac{5.30 - 5}{5 - 1} = 0.075$$

$$CR = \frac{0.075}{1.12} \approx 0.07$$

因此, 一级指标判断矩阵的随机一致性比值 CR 为 $0.07 < 0.1$, 认为该层次单排序有效。一级指标的单排序权重为: $\{0.17, 0.17, 0.19, 0.19, 0.28\}$ 。

同理, 计算二级指标的层次单排权重并通过一致性检验 (过程不再详细展示), 最终, 各二级指标的层次单排权重结果如下:

“清晰性”的单排权重为: $\{0.48, 0.23, 0.29\}$;

“可用性”的单排权重为: $\{0.14, 0.43, 0.43\}$;

“高效性”的单排权重为: $\{0.48, 0.29, 0.23\}$;

“激励性”的单排权重为: $\{0.14, 0.43, 0.43\}$;

“学科性”的单排权重为: $\{0.43, 0.43, 0.14\}$ 。

4.3.3 层次总排序

上述过程中求出是同一层级中相对元素对于上一层级中某个指标相对重要性的排序权值，称为层次单排序。计算同一层级所有因素对于总目标相对重要性的排序权值叫做层次总排序。以一级指标“清晰性”下的二级指标“布局清晰性”为例，“布局清晰性”的层次总排序权重为其层次单排序权重乘一级指标“清晰性”的单排序权重，即 $0.48 \times 0.17 \approx 0.082$ 。

同理，可计算出其余二级指标的层次总排序权重（过程不再详细展示）。各二级指标的层次总排序权重结果如下：

“清晰性”的总排序权重为：{0.082、0.039、0.049}；

“可用性”的总排序权重为：{0.024、0.073、0.073}；

“高效性”的总排序权重为：{0.091、0.055、0.044}；

“激励性”的总排序权重为：{0.026、0.082、0.082}；

“学科性”的总排序权重为：{0.120、0.120、0.040}。

4.4 评价指标体系确定

经过上述两轮专家指导的评审意见以及层次分析法对权重的确定，构建了一套完整的基于用户体验的动态数学软件评价指标体系（见表 4-9），并绘制了基于用户体验的动态数学软件评价指标体系结构图（如图 4-2 所示）。

表 4-9 基于用户体验的动态数学软件评价指标体系

一级指标	二级指标	评价标准
清晰性 (0.17)	布局清晰性 (0.082)	界面设计以及视觉风格要符合产品的定位和用户的习惯，界面清晰简洁重点突出，风格一致
	内容清晰性 (0.039)	内容和信息的呈现形式清晰明确，主题突出，分配合理，互不冲突，元素内容要与功能紧密结合
	结构清晰性 (0.049)	软件的信息架构和交互流程逻辑清晰，页面之间的跳转是符合常理思维的
可用性 (0.17)	安装注册体验 (0.024)	能快速找到软件的安装链接，安装过程是快捷的，在网络状态可免安装；软件的注册是流畅的，注册渠道多样
	操作性 (0.073)	可根据用户需求对软件进行不同程度的设置和操作
	容错性 (0.073)	减少用户犯错次数，及时反馈并快速恢复正常状态
高效性 (0.19)	易学性 (0.091)	帮助初次使用用户快速操作软件，减小长期使用用户的记忆负荷，使软件轻松上手，利用视觉提示、文字提示等方

		式增强信息反馈
	快捷性 (0.055)	通过减少选择负担、减少导航负担、减少重复步骤来提高软件的工作效率
	即时性 (0.044)	提高软件的响应速度，减少用户的等待时间，始终让用户知道当前的状况，明确下一步的工作任务
激励性 (0.19)	趣味性 (0.026)	在使用软件过程中是顺利的、愉悦的、感到实用的，能提高用户对软件的使用率和忠诚度
	服务性 (0.082)	对用户所提供的一系列个人信息的保护措施和个性化服务，并增强软件的后期维护
	交互性 (0.082)	具有良好、高效、及时的沟通平台快速解决用户问题，增加不同类型的用户、用户与开发者、用户与软件之间的交流互动
学科性 (0.28)	动态性 (0.120)	动态地展现几何图形中变量与不变量之间的关系，帮助用户理解几何性质
	直观性 (0.120)	直观展示抽象的数学问题，用户通过观察就能了解动态逼近的数学本质
	专业性 (0.040)	根据软件不同的功能定位调整“写画测变，编演推算”八大独有的数学功能在软件中的重要程度和操作深度

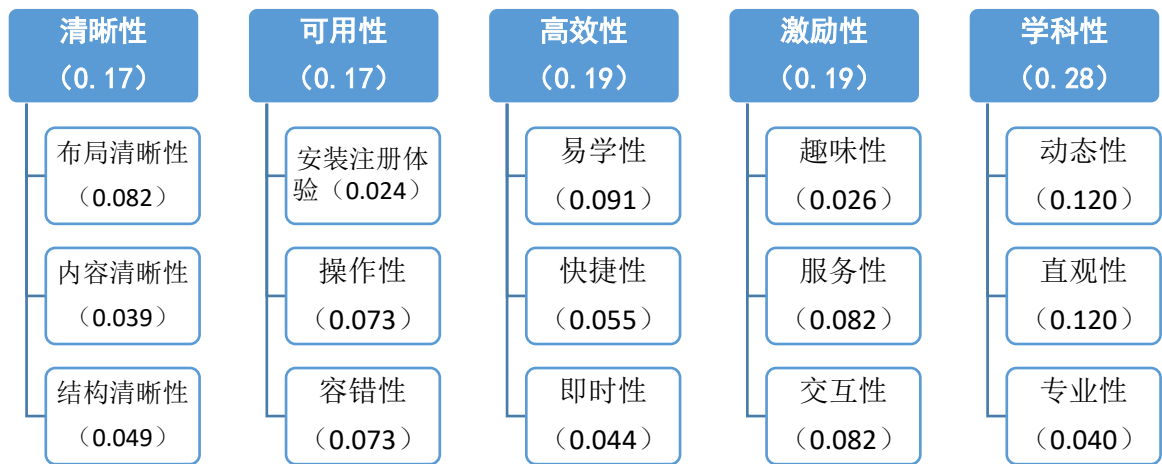


图 4-2 基于用户体验的动态数学软件评价指标体系结构图

4.5 本章小结

本章主要介绍了基于用户体验的动态数学软件评价指标体系的构建流程。根据第三章的 CCEMS 模型构建了基于用户体验的动态数学软件预设评价指标体系，包括 5 个一级指标和 14 个二级指标，并解释了各级指标含义和评价标准。利用德尔菲法进行两轮专家指导与修订，对各级指标进行了修订和完善。再利用层次分析法确定了各级指标的权重值，最终形成了完整的基于用户体验的动态数学软件评价指标体系。

第五章 动态数学软件评价指标体系应用举例

5.1 评价方案

5.1.1 评价对象、方法及过程

按照评价的发生时间,通常可以将评价分为诊断性评价、形成性评价和总结性评价。在实际的产品设计开发中,对产品的质量评估往往是三种评价方式相结合进行。诊断性评价是在对产品开始设计之前,对产品用户需求、产品的定位、相似产品的市场现状进行调研,针对目前市场存在的问题及本类产品的通用要求,确定产品目标,使开发者设计出更加适合用户需求的产品。形成性评价一般是在软件开发设计的过程中,首先要经过严格的内部测试和完善,不断发现并解决一些较为明显的问题,直到该产品形成并投入市场成为一种产品,在初运营阶段,还需要不断收集用户的意见和建议,根据实际情况对产品进行调整和修订,更新迭代,直至形成较为成熟的产品。总结性评价是指产品在内部测试已经完成或者通过市场运营阶段后的关键时间点进行的最终评价,总结性评价不代表着产品结束质量调整,而是对产品在一段时间内的阶段性整体评价,进行有意义的总结。

而在科研工作中,国内外对教育软件的评价工作较多的是利用总结性评价方式。一般过程为教育专家、学者、教育管理机构或者教育评价组织进行问卷设计,邀请相关人员(主要包括相关领域的专家、机构研究人员、学校研究人员、优秀教师、软件开发设计师、软件工程师、软件运营人员、软件公司管理中层、学生、家长等使用者)回答问题并进行评分,收集大量问卷后对结果进行统计分析,得出相应的结论。利用评价指标体系和问卷调查需要注意评价指标的科学性和完整性,以及问卷调查问题设置的规范性,确保调查的数据没有偶然性,注重客观性和真实性,才能得出科学的、有实际意义的产品质量评价结果。

根据在实际生产实践和科研相关工作的常用方法,本研究中对示例教育软件的质量评估工作的对象、方法和过程设计如下。本次软件测评主要应用调查问卷法,根据基于用户体验的动态数学软件评价指标体系设计调查问卷,选择有两年以上使用示例软件经历的在校学生、教师、软件开发师、产品经理、产品运营人员等,根据自身对示例软件的用户体验感填写问卷,收集问卷数据进行统计分析,制定评分标准,将结果根据评分标准进行分析,总结软件的优劣性,并根据其不足给出一些建设性的建议。

5.1.2 评分标准

问卷主体部分的使用评价调查中,按照李克特五点量表计分方式(非常同意—5分、同意—4分、一般—3分、不同意—2分、很不同意—1分)进行判断打分。根据所有有效问卷的打分结果,计算出每一题的平均得分 V ,继而根据每一指标的权重值算出该软件的加权总得分 S 。

根据实际情况,每个题项的平均得分 V (取值范围1~5)的评分标准如下:

当 $V \geq 4.5$ 时,认为该软件在该指标上表现非常优秀,实现度非常高;

当 $4.5 > V \geq 4$ 时,认为该软件在该指标上表现良好,实现度高;

当 $4 > V \geq 3.5$ 时,认为该软件在该指标上表现一般,有可改进的地方;

当 $3.5 > V \geq 3$ 时,认为该软件在该指标上表现较差,改进空间大;

当 $3 > V \geq 2.5$ 时,认为该软件在该指标上表现非常欠缺,亟待改进;

当 $V < 2.5$ 时,认为该软件在该指标上不合格,未通过评价测评。

软件的总得分 S (取值范围1~5)的评分标准如下:

当 $S \geq 4.5$ 时,认为该软件在用户体验上非常完美,质量较高,能满足用户需求;

当 $4.5 > S \geq 3.5$ 时,认为该软件在用户体验上较好,质量不错,基本能满足用户需求;

当 $3.5 > S \geq 2.5$ 时,认为该软件在用户体验上一般,对用户有一定作用,还需改进;

当 $2.5 > S \geq 1$ 时,认为该软件在用户体验上差,用户使用度低,亟待改进。

5.2 网络画板质量测评

5.2.1 网络画板简介

网络画板是在中国科学院张景中院士亲自参与下,团队多年积累的成果——超级画板的基础上,为适应互联网、移动互联网环境下教育信息化发展的新趋势,运用国内领先的多种信息技术和智能技术开发的第一款国内移动互联网环境下的动态数学学科教学工具。其设计目标是打造开放的、共享的数学学习平台,为师生提供丰富、便捷的数学学习工具和大量优质教学资源。

网络画板于2015年进入市场,随着近两年体验设计不断改进和优化,因其跨平台、多终端、资源可共建共享、使用便捷等特点,用户数量和资源数量明显上升,用户黏性得到提高,平台用户超过35万,汇聚课件资源超过13万。

5.2.2 网络画板评价结果分析

1. 问卷设计

根据基于用户体验的动态数学软件评价指标体系，从用户的角度出发，将二级指标的评价标准重新改写，设计了“网络画板用户体验质量测评调查问卷”（详见附录三）。该问卷包括两个部分：

第一部分说明本次调查问卷的目的，承诺保护用户的隐私信息，并表达谢意；

第二部分是问卷的主体部分，首先了解用户的基本信息，包括性别、年龄段和职业；然后网络画板的评价表，采取封闭式填写的方式，用户根据自己的使用情况给网络画板打分，在“非常不符合”、“不符合”、“一般”、“符合”和“非常符合”中选其一。如果对于网络画板还有其他的意见和建议，可以在开放式回答题中填写。

2. 问卷结果与分析

问卷设计和制作完后，将问卷通过网络方式进行调查，把问卷发到网络画板用户群里，并向其说明问卷调查目的和用途，要求用户如实填写，最终在 3 天时间内收集到 43 名资深用户，职业包含了在校学生、教师、软件研发人员、产品经理等，其中有效问卷为 43 份，回收率 100%。

基本信息：在本次调查中，共 43 人填写问卷，其中男士 32 人，占 74.42%，女士 11 人，占 25.58%，如图 5-1 所示。18 岁以下 1 人，19-30 岁 14 人，31-50 岁 22 人，占比人数较多，50 岁以上 6 人，年龄段人数分布如图 5-2 所示。职业调查中，学生和教师、专家的人数较多，共 40 人，占 93.02%，其他职业中包括研发人员和产品经理，如图 5-3 所示。

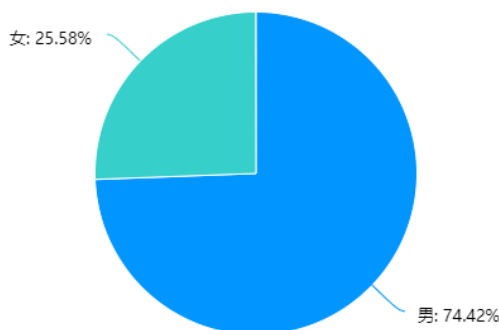


图 5-1 用户性别分布

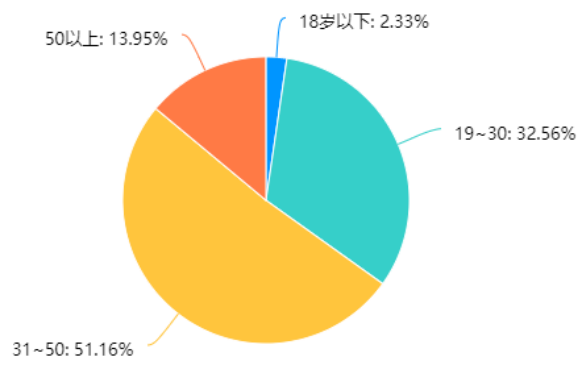


图 5-2 用户年龄段分布

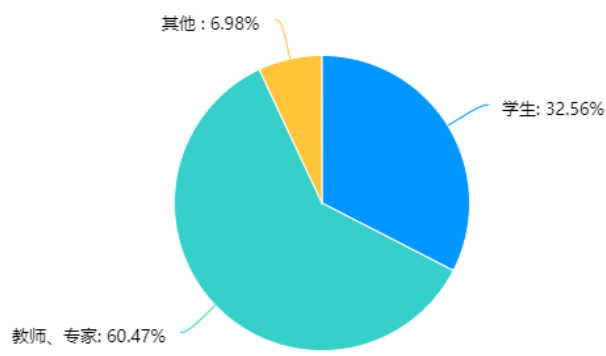


图 5-3 用户职业分布

在问卷星平台，对第 4-28 题进行整理，统计每一选项的被选次数与百分比，以及每一题的平均分和对应考查的二级指标，形成答题数据统计表，如表 5-1 所示。

表 5-1 答题数据统计表

题号	非常不符合	不符合	一般	符合	非常符合	平均分	对应指标	加权平均分
4	0	0	1 (2.33%)	10 (23.26%)	32 (74.42%)	4.72	布局清晰性	0.3870
5	0	1 (2.33%)	4 (9.3%)	10 (23.26%)	28 (65.12%)	4.51	内容清晰性	0.1759
6	0	0	2 (4.65%)	12 (27.91%)	29 (67.44%)	4.63	结构清晰性	0.2269
7	0	0	4 (9.3%)	6 (13.95%)	33 (76.74%)	4.67	安装注册体验	0.1121
8	0	1 (2.33%)	4 (9.3%)	8 (18.6%)	30 (69.77%)	4.56	操作性	0.3329
9	0	0	10 (23.26%)	8 (18.6%)	25 (58.14%)	4.35	容错性	0.3303
10	0	0	3 (6.98%)	7 (16.28%)	33 (76.74%)	4.7	容错性	

11	1 (2.33%)	1 (2.33%)	8 (18.6%)	9 (20.93%)	24 (55.81%)	4.26	易学性	0.3959
12	0	0	8 (18.6%)	8 (18.6%)	27 (62.79%)	4.44	易学性	
13	0	0	6 (13.95%)	10 (23.26%)	27 (62.79%)	4.49	快捷性	0.2475
14	0	0	7 (16.28%)	7 (16.28%)	29 (67.44%)	4.51	快捷性	
15	0	0	5 (11.63%)	13 (30.23%)	25 (58.14%)	4.47	即时性	0.1967
16	0	0	4 (9.3%)	8 (18.6%)	31 (72.09%)	4.63	趣味性	0.1204
17	0	0	4 (9.3%)	4 (9.3%)	35 (81.4%)	4.72	服务性	0.3821
18	0	0	4 (9.3%)	4 (9.3%)	35 (81.4%)	4.72	服务性	
19	0	1 (2.33%)	4 (9.3%)	3 (6.98%)	35 (81.4%)	4.67	服务性	
20	0	1 (2.33%)	5 (11.63%)	7 (16.28%)	30 (69.77%)	4.53	服务性	
21	0	1 (2.33%)	6 (13.95%)	10 (23.26%)	26 (60.47%)	4.42	交互性	0.3788
22	0	0	3 (6.98%)	6 (13.95%)	34(79.07 %)	4.72	交互性	
23	0	1 (2.33%)	2 (4.65%)	5 (11.63%)	35 (81.4%)	4.72	交互性	
24	0	0	4 (9.3%)	5 (11.63%)	34 (79.07%)	4.7	动态性	0.5640
25	0	0	5 (11.63%)	6 (13.95%)	32 (74.42%)	4.63	直观性	0.5556
26	0	0	4 (9.3%)	6 (13.95%)	33 (76.74%)	4.67	专业性	0.1836
27	0	0	7 (16.28%)	7 (16.28%)	29 (67.44%)	4.51	专业性	
28	0	0	4 (9.3%)	9 (20.93%)	30 (69.77%)	4.6	专业性	

从上表以看出,评分大于 4.5 的共有 19 项,对应的二级指标有布局清晰性、内容清晰性、结构清晰性、安装注册体验、操作性、容错性、快捷性、趣味性、服务性、交互性、动态性、直观性和专业性。这些数据表明,网络画板在结构层的设计是符合逻辑的,页面之间的跳转合理,界面是简洁明了的,根据用户的需求,做了很多细节的处理,如选中对象颜色分层、透明度的变化等,每一框架内容的呈现易懂;网络画板能免安装,

且注册方式多样、简单，可操作性强，能通过快捷键、导航等设计提高效率；能有效保护用户的个人信息，为用户提供一系列个性化服务，通过各种社群提高了用户、开发者和软件之间的交互；网路画板在学科性上表现优越，不仅能满足教师在动态几何方面的需求，而且在代数计算和概率统计上也具有强大的功能，是一款集成性很强的智能化数学软件。

评分在 4~4.5 之间的共有 6 项，对应的二级指标有易学性、即时性。网络画板是一款专业的数学软件，因此在学习使用的过程中具有一定的难度、需要一定的时间学习，且长时间不使用，再次使用容易造成遗忘，应提供更多的帮助信息和问题解决方法提示来帮助用户上手，而不是让用户记忆功能操作。网络画板在即时感知状态上得分较低，应加强用户感知状态的能力，帮助用户进行下一步的工作。在交互性上，与其他办公软件无缝对接得分较低，通过分析开放性问题的回答，发现原因是无法与所有版本的 Powerpoint 融合，由于浏览器的兼容性问题，因此需要用户升级办公软件的版本。

清晰性的平均分为 4.62，表明网络画板在清晰性上表现较好，具有良好的视觉效果和色彩搭配。可用性的平均得分为 4.57，表明网络画板整体的可用程度尚可，能满足用户的需求。高效性的平均得分为 4.43，表示网络画板在提高用户效率方面还需改进，减小用户的记忆负担。激励性的平均得分为 4.64，表明网络画板能有效促进用户的学习兴趣，增加用户黏度。学科性的平均得分为 4.62，表明网络画板具有强大的数学功能，功能齐全且专业，能满足不同层次的用户的学习需求。

最后，根据各级指标所占权重算出网络画板的加权总分为 4.59，表明网络画板的整体用户体验质量测评非常好，交互便利，能满足用户的基本需求，是一款较为成熟的动态数学软件。

5.2.3 网络画板提升建议

基于上述网络画板的测评结果与原因分析，针对不足之处提出以下三点提升建议：

1. 减小用户的学习难度。可通过帮助文档、短视频等帮助初学者入门，在使用中利用适当的提示帮助再次使用的用户进行操作回忆，还可通过增强用户之间的交流帮助解决学习中的问题，从而增加各层次用户的易学度。
2. 加强交互反馈。软件要注重优化细节，通过颜色分层、透明度对比等方式告知用户操作对象的状态；简化函数、公式输入的方式，使更加直观明了。
3. 增强误操作的包容性。软件在容错性上得分较低，要注重即时告知用户正确操作

方法，减少用户出错的机会；若用户已操作失误，要立即反馈，并告知错误原因，返回错误前的状态。

5.3 本章小结

本章主要以基于用户体验的动态数学软件评价指标体系作为参考，对网络画板进行质量测评实验。在对比科研工作和实际产品开发中的评价工作后，选用了总结性评价的方式对网络画板进行测评，确定了研究对象、研究方法和研究过程。根据评价指标体系的各级指标的内涵和评价标准，设计并实施问卷调查，依据方案中的评分标准对网络画板进行各指标打分以及总体得分，并针对网络画板的优劣性，提出一些建设性的意见和建议。本次应用举例不仅表现了网络画板在用户体验上具有较高的实现度，也证实了该动态数学软件评价指标体系具有可操作性和实施性，能够对市场上的动态数学软件进行科学性的评价。

第六章 总结与展望

6.1 研究总结

动态数学软件因其灵活性、开放性和便捷性而广泛存在于教育软件市场,推动了教育信息化时代的发展。动态数学软件想要得到长期发展,必须关注其用户体验感,因此如何对动态数学软件在用户体验上进行质量评价,成为教育信息化时代十分重要的问题。

本文首先对用户体验和动态数学软件进行理论概述和现状分析,并基于现有的经典的用户体验模型上,结合动态数学软件的特点,遵循科学性、系统性、可操作性和特殊性原则的前提下,形成了以清晰性(Clarity)、可靠性(Credibility)、高效性(Efficiency)、激励性(Motivation)和学科性(Subject)为五大核心要素的 CCEMS 模型。

以 CCEMS 模型为指导,结合相关教学理论和多媒体学习理论,形成了基于用户体验的动态数学软件预设评价指标体系。利用德尔菲法对各级指标进行修订和完善,构建了 5 个一级指标、15 个二级指标的评价指标体系。再利用层次分析法确定了各级指标的权重值,形成了完整的基于用户体验的动态数学软件评价指标体系。

利用该评价指标体系,对网络画板进行用户体验质量评价。根据各指标评价标准确定评价方案及设计调查问卷,实施调查,收集统计数据,按照评分标准对每一项指标和整体情况进行打分,结合调查结果分析网络画板的优劣性,并提出一些建设性的建议。网络画板的用户体验质量测评证明了该评价指标体系的可操作性和有效性。

6.2 不足与展望

目前基于用户体验的动态数学软件评价研究较少,缺少可借鉴的经验与方法。本文在动态数学软件用户体验评价研究的不足之处有以下几点:

1. 利用德尔菲法和层次分析法中,由于本人能力有限,参与的专家人数较少,专家涉及的专业范围不够广,导致评价指标体系可能存在一定的主观性,对各级指标的内容和评价标准考虑不够周全;

2. 网络画板问卷调查人数和涉及的范围不够广。调查对象应该来自不同地区、不同职业和不同年龄段,且人数应该为评价指标的 3-5 倍,这样的调查问卷才具有参考价值。由于动态数学软件的数学专业性较强,有网络画板使用经验的人数较少,因此选取调查对象较困难,有效的问卷数量较少;

3. 由于调查对象和时间的限制, 本文只对网络画板一款动态数学软件进行了测评, 该评价指标体系对其他动态数学软件是否具有可操作性和实践性还有待证明。

针对上述提出的不足, 未来的工作可以从以下几个方面进行:

1. 邀请更多领域的专家学者对评价指标和其权重值进行修订和完善, 或者利用更科学有效的方法确定动态数学软件用户体验评价指标体系;

2. 扩大调查对象, 随着网络画板用户的不断增加, 慢慢增加调查对象的人数和涉及范围, 增强数据的科学性和客观性。

3. 增加质量测评的动态数学软件。可对几何画板、Geogebra、Cabri 等多款经典的动态数学软件进行用户体验质量测评, 从而在实践中不断改善该评价指标体系, 最终为用户提高更好的使用体验。

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 教育部关于印发《教育信息化 2.0 行动计划》的通知[EB/OL]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/201804/t20180425_334188.html, 2018-04-25/2021-01/20.
- [2] 宋莉娜, 方芳. 从美国获奖儿童教育 APP 看其体系化评价机制——以 common Sense 评选的教育类 APP 为例[J]. 陕西学前师范学院学报, 2015, 31(03): 12-16.
- [3] 马玉慧, 赵乐, 李南南, 等. 新型移动学习资源——教育 APP 发展模式探究[J]. 中国电化教育, 2016(04): 64-70.
- [4] 刘丹, 胡卫星, 李玉斌, 等. 移动教育 APP 的研发现状与应用问题分析[J]. 电化教育研究, 2016, 37(08): 47-52.
- [5] 中国互联网络信息中心. 第 46 次《中国互联网络发展状况统计报告》[EB/OL]. http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwzxbg/hlwtjbg/202009/t20200929_71257.htm, 2020-09-29/2021-01-20.
- [6] 中国互联网络信息中心. 第 41 次《中国互联网络发展状况统计报告》[EB/OL]. http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwzxbg/hlwtjbg/201803/t20180305_70249.htm, 2018-03-05/2021-01-20.
- [7] J. Wang, L. Zhang, C. Li, R. Cai, W. Chen, Y. Rao*. "Research on the Evaluation of Dynamic Mathematics Software Based on User Experience." 2020 15th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), Netherlands.
- [8] 郭家乐. 小学科学教育 APP 质量评价指标体系构建研究[D]. 华中师范大学, 2019.
- [9] 张凤丹, 陈仕品. 教育 APP 的应用问题分析及对策研究[J]. 中国教育信息化, 2017(14): 80-84.
- [10] 王津津. 儿童教育 APP 评价指标体系构建与应用研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2018: 1-50.
- [11] 丁一, 郭伏, 胡名彩. 用户体验国内外研究综述[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(04): 92-97+114.
- [12] 唐纳德·诺曼. 设计心理学[M]. 北京: 中信出版社, 2003. NORMAND A. The Design of Everyday Things[M]. Beijing: Zhongxin Press, 2003.
- [13] 朱佳. 基于设计心理学与人机交互技术的界面可用性研究[D]. 上海交通大学, 2010.

- [14] ROBERT J M, LESAGE A. 15 Designing and Evaluating User Experience [J]. Behaviour & Information Technology, 2011, 30(6): 867-868.
- [15] The 20th International Conference of the Association Francophone D'interaction Homme-Machine[J]. IHM, 2008, 339(8): 11-15.
- [16] PETTERSSON I, LACHNER F, FRISON A K, et al. A Bermuda Triangle: a Review of Method Application and Triangulation in User Experience Evaluation[C]. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2018.
- [17] UPA(Usability Professionals' Association), Usability Body of Knowledge. <http://www.usabilitybok.org/glossary>.
- [18] ISO. 9241-210: 2010. Ergonomics of human system interaction-Part 210: Human-centered design for interactive systems(formerly know as 13407). International Organization for Standardization(ISO). Switerland, 2010: 7-9.
- [19] Garrett J J. The Elements of User Experience: User-Centered Design f or the Web. New York: New Riders Publishing, 2003: 13-20.
- [20] Hassenzahl M. The quality of interactive products: hedonic needs, emotions and experience//Ghaoui (Ed.). Encyclopedia of Human-Computer Interaction. PA: Idea Group, 2005: 652-660.
- [21] Jesse James Garrett. (美). 范晓燕译. 用户体验要素以用户为中心的产品设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. P28-31.
- [22] Jokob Nielsen. Usability Engineering. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [23] 焦婧, 杜建萍. 基于用户体验的网络体验模型的构建与应用研究[J]. 北京联合大学学报, 2014, 28(01): 22-25.
- [24] MahlkeS. Factorsinfluencingthe experienceof website usage//CHI' 02 Extended Abstracts. New York: ACM Press, 2002: 846-847.
- [25] Hassenzahl M, Tranctinsky N. User experience - a research agenda[J]. Behaviour & Information Technology, 2006, 25(2):91-97.
- [26] Rubinoff R. How to quantify the user experience[J]. [2006-06-11]. <http://www.sitepoint.com/print/quantify-user-experience>.
- [27] 詹英. 计算机辅助教学软件评价技术研究[D]. 华东师范大学, 2001.
- [28] Jie Wang, Yongsheng Rao, Ruxian Chen, Hao Guan, Ying Wang, Xiaohong Shi. The

Iteration Function on NetPad. The 14th International Conference on Computer Science & Education. IEEE, 2019: 439-443.

[29] 张景中, 彭翥成. 谈超级画板的设计理念[J]. 中学数学月刊, 2012(10): 1-5.

[30] 张景中, 江春莲, 彭翥成. 《动态几何》课程的开设在数学教与学中的价值[J]. 数学教育学报, 2007(03): 1-5.

[31] 张景中, 彭翥成. 三款数学教育软件的比较与设计思想分析[J]. 中国电化教育, 2010(01):107-113.

[32] The Geometer's Sketchpad. <http://www.dynamicgeometry.com>, 2021/2/19.

[33] Bantchev B B. A brief tour to dynamic geometry software[J]. CaMSP February 2015 Newsletter, 2010.

[34] Cabri, <http://www.cabri.com>, 2021/2/19.

[35] GeoGebra. <http://www.geogebra.org>, 2021/2/19.

[36] Martin von Gagern, Ulrich Kortenkamp, Jürgen Richter-Gebert et al. Cindy JS. International Congress on Mathematical Software. Springer, 2016: 319-326.

[37] NetPad.<http://www.netpad.net.cn>, 2021/2/19.

[38] 梁平. 数学 CAI 课价评价指标研究[D]. 广西师范大学, 2007.

[39] Heck W, Johnson J, and Kansky R. Guidelines for Evaluating Computerized Instructional Materials, National Council for Teachers of Mathematics, Reston, Virginia. 1981.

[40] 方海光. 我国教育软件价值评测研究[D]. 中国科学院研究生院(成都计算机应用研究所), 2006.

[41] LEE C Y, CHERNERTS. A comprehensive evaluation rubric for assessing instructional apps [J]. Journal of Information Technology Education Research, 2015(14): 8-15.

[42] 赵慧臣, 陆晓婷, 张银平. 教育类 APP 评价的理论分析与实施开展[J]. 电化教育研究, 2018, 39(06): 98-106.

[43] Lewis J R. Usability testing [M]//Salvendy G. Handbook of Human Factors and Ergonomics. New York: John Wiley, 2006:1275-1316.

[44] 龚朝花, 曾雪庆. 基于 PACTS 模型的教育 APP 质量评价指标体系研究[J]. 现代教育技术, 2018, 28(01): 45-51.

[45] 方海光, 张景中. 教育软件可用性评测研究[J]. 电化教育研究, 2008(02): 63-67+76.

[46] 赵文静. 数学教育网站评价指标体系的设计与建构[D]. 广州大学, 2006.

- [47] 孙杰远. 现代数学教育学[M]. 桂林: 广西师范大学, 2004.
- [48] 何克抗. 信息技术与课程深层次整合的理论与方法[J]. 电化教育研究, 2005(01): 7-15.
- [49] 何克抗. 从 Blending Learning 看教育技术理论的新发展(上)[J]. 电化教育研究, 2004(03): 1-6.
- [50] 何克抗. 从 Blending Learning 看教育技术理论的新发展(下)[J]. 中国电化教育, 2004(04): 10-15.
- [51] Mishra,P. & Kolehler, M. Technology pedagogical content knowledge: A new framework for teacher knowledge[J]. Teacher College Record, 2006, 108(6): 1017-1054.
- [52] 徐章韬. 信息技术支持下的学科教学知识: 缘起、演化、结构模型及其教育意蕴[J]. 教育发展研究, 2012, 32(10): 62-68.
- [53] 徐章韬, 刘郑, 刘观海, 陈矛. 信息技术支持下的学科教学知识之课例研究[J]. 中国电化教育, 2013(01): 94-99.
- [54] 黄荣怀, 王晓晨, 李玉顺. 面向移动学习的学习活动设计框架[J]. 远程教育杂志, 2009, 17(01): 3-7.
- [55] 赖晓云. 多媒体教学软件信息设计与加工策略研究——基于梅耶多媒体教学设计原理[J]. 电化教育研究, 2015, 36(01): 77-82.
- [56] 王建中, 曾娜, 郑旭东. 理查德·梅耶多媒体学习的理论基础[J]. 现代远程教育研究, 2013(02): 15-24.
- [57] 张景中, 彭翥成. 深入数学学科的信息技术[J]. 数学教育学报, 2009, 18(05): 1-7.
- [58] 徐章韬. “Z+Z”智能教育平台:实施变异理论的一个抓手[J]. 数学教育学报, 2012, 21(04): 28-31.
- [59] 徐章韬, 虞秀云. 信息技术使数学史融入课堂教学的研究[J]. 中国电化教育, 2012(01): 109-112.
- [60] 徐章韬. 用信息技术深度挖掘课程内容——以数学学科为例[J]. 教育发展研究, 2015, 35(12): 29-33.
- [61] 赵鑫蕊, 周雨青, 瞿林云, 张志红. 基于层次分析法的大学物理 MOOC 教学质量评价指标体系的构建[J]. 物理与工程, 2018, 28(04): 45-56.

附录一

基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家评定问卷

（第一轮）

尊敬的老师：

您好！我是广州大学计算机科学与网络工程学院教育技术学专业研究生，在硕士学位论文中开展基于用户体验的动态数学软件评价指标体系构建研究。恳请您在百忙之中为基于用户体验的动态数学软件预设评价指标体系提出宝贵意见！本问卷意在收集专家老师对评价体系整体架构和具体指标的评价和修改意见，这一评价体系共有 5 个一级指标、14 个二级指标，以及对二级指标的描述。请您根据描述对每一指标进行评价，在“合理”、“修改后合理”和“不合理”三者中选一。“合理”表示该指标及其评价标准的描述非常准确，不用进行修改；“修改后合理”表示该指标及其评价标准的描述有必要进行保留，但是准确度不够，需要进行修改完善；“不合理”表示该指标及其评价标准的描述没有必要保留，应当删除。对于“修改后合理”及“不合理”的指标，在“修改意见”提出您对该指标及其评价标准的描述的建议和看法，最后，在“其他修改意见”提出您对评价指标体系的整体意见或者其他建设性的建议均可。本问卷仅限学术研究内使用，将严格保密！非常感谢您的协助，祝您工作顺利，生活愉快！

计算机科学与网络工程学院

研究生王婕敬上

基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家修改表

一级指标	二级指标	评价标准描述	合理	修改后合理	不合理	修改意见
清晰性	布局清晰性	界面设计以及视觉风格要符合产品的定位和用户的习惯，界面清晰简洁重点突出，风格一致				
	内容清晰性	资源、内容和信息的呈现形式清晰明确，分配合理，互不冲突				

	结构清晰性	软件的信息架构和交互流程逻辑清晰，软件页面和功能之间的主次关系明显				
可靠性	可控性	可根据用户需求对软件进行不同程度的设置和操作				
	容错性	减少用户犯错次数，及时反馈并快速恢复正常状态				
高效性	易学性	帮助初次使用用户快速操作软件，减小长期使用用户的记忆负荷，使软件轻松上手				
	快捷性	通过减少选择负担、减少导航负担、减少重复步骤来提高软件的工作效率				
	即时性	通过适当的反馈，始终让用户知道当前的状况，明确下一步的工作任务				
激励性	趣味性	在使用软件过程中是顺利的、愉悦的、感到实用的，能提高用户对软件的使用率和忠诚度				
	良好的服务	对用户提供的系列个人信息的保护措施和个性化服务				
	互动便利	具有良好、高效、及时的沟通平台快速解决用户问题，增加不同类型的用户、用户与开发者、用户与资源之间的互动				

学科性	动态性	动态地展现几何图形中变量与不变量之间的关系，帮助用户理解几何性质				
	直观性	直观展示抽象的数学问题，用户通过观察就能了解动态逼近的数学本质				
	专业性	具有“写画测变，编演推算”八大独有的数学功能				

其他修改意见：

附录二

基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家评定问卷

（第二轮）

尊敬的老师：

您好！我是广州大学计算机科学与网络工程学院教育技术学专业研究生，在硕士学位论文中开展基于用户体验的动态数学软件评价指标体系构建研究。恳请您在百忙之中为基于用户体验的动态数学软件预设评价指标体系提出宝贵意见！本问卷经过第一轮专家老师的评审和修改意见后，完善了评价指标体系共有 5 个一级指标、15 个二级指标，以及对二级指标的描述，并提供第一轮专家修改意见汇总和根据专家意见做出的修改情况汇总供您参考。请您根据描述对每一指标进行评价，在“合理”、“修改后合理”和“不合理”中三选一。“合理”表示该指标及其评价标准的描述非常准确，不用进行修改；“修改后合理”表示该指标及其评价标准的描述有必要进行保留，但是准确度不够，需要进行修改完善；“不合理”表示该指标及其评价标准的描述没有必要保留，应当删除。对于“修改后合理”及“不合理”的指标，在“修改意见”提出您对该指标及其评价标准的描述的建议和看法，最后，在“其他修改意见”提出您对评价指标体系的整体意见或者其他建设性的建议均可。本问卷仅限学术研究内使用，将严格保密！非常感谢您的协助，祝您工作顺利，生活愉快！

计算机科学与网络工程学院

研究生王婕敬上

第一轮专家评定意见汇总表

一级指标	二级指标	平均分	标准差	修改意见
清晰性	布局清晰性	3	0	
	内容清晰性	2.83	0.37	
	结构清晰性	2.67	0.47	“软件页面与功能”描述不专业，建议修改为“页面与页面之间”
可靠性	可控性	2.67	0.47	名称改为“操作性”
	容错性	3	0	
高效性	易学性	3	0	

	快捷性	2.87	0.37	
	即时性	2.87	0.37	“适当的反馈”描述太抽象，应改为“相应速度”
激励性	趣味性	3	0	
	良好的服务	2.87	0.37	名称改为“服务性”，不仅是对个人信息的保密性和个性化服务，开发者还应增强对软件的维护
	互动便利	2.87	0.37	名称改为“交互性”
学科性	动态性	3	0	
	直观性	3	0	
	专业性	2.67	0.47	软件要根据自身的定位对八大功能的重要程度做出不同的调整
其他修改意见	将一级指标“可靠性”改为“可用性”； 一级指标“可用性”下增加“注册、安装体验”二级指标，衡量软件的安装便捷度、软件的注册流畅性和注册渠道。			

基于用户体验的动态数学软件评价指标体系专家修改表

一级指标	二级指标	评价标准描述	合理	修改后合理	不合理	修改意见
清晰性	布局清晰性	界面设计以及视觉风格要符合产品的定位和用户的习惯，界面清晰简洁重点突出，风格一致				
	内容清晰性	资源、内容和信息的呈现形式清晰明确，分配合理，互不冲突				
	结构清晰性	软件的信息架构和交互流程逻辑清晰，页面之间的跳转是符合常理思维的				

可用性	操作性	可根据用户需求对软件进行不同程度的设置和操作				
	容错性	减少用户犯错次数，及时反馈并快速恢复正常状态				
	安装注册体验	能快速找到软件的安装链接，安装过程是快捷的，在网络状态可免安装；软件的注册是流畅的，注册渠道多样				
高效性	易学性	帮助初次使用用户快速操作软件，减小长期使用用户的记忆负荷，使软件轻松上手				
	快捷性	通过减少选择负担、减少导航负担、减少重复步骤来提高软件的工作效率				
	即时性	提高软件的响应速度，减少用户的等待时间，始终让用户知道当前的状况，明确下一步的工作任务				
激励性	趣味性	在使用软件过程中是顺利的、愉悦的、感到实用的，能提高用户对软件的使用率和忠诚度				
	服务性	对用户提供的系列个人信息的保护措施和个性化服务，并增强软件的后期维护				
	交互性	具有良好、高效、及时的				

		沟通平台快速解决用户问题，增加不同类型的用户、用户与开发者、用户与资源之间的互动				
学科性	动态性	动态地展现几何图形中变量与不变量之间的关系，帮助用户理解几何性质				
	直观性	直观展示抽象的数学问题，用户通过观察就能了解动态逼近的数学本质				
	专业性	根据软件不同的功能定位调整“写画测变，编演推算”八大独有的数学功能在软件中的重要程度和操作深度				

其他修改意见：

附录三

网络画板用户体验质量测评调查问卷

您好，为了调查“网络画板”的用户体验满意度，设计以下问卷，请您帮助填写。承诺不会透露您的任何信息，感谢您的配合！

1. 您的性别：

☐男 ☐女

2. 您的年龄段：

☐18 岁以下 ☐19~30 ☐31~50 ☐50 以上

3. 您目前从事的职业：

☐学生

☐教师、专家

☐软件技术/研发人员

☐UI 设计师

☐产品经理

☐其他 _____

请根据您的使用情况和经验，给“网络画板”打分（满分 5 分）。1 分表示非常不符合，5 分表示非常符合。

4. 界面色彩搭配合理，布置十分清晰，我清楚地知道菜单栏、工具栏、画布和可移动区域每一个板块的位置，界面的设计与我的习惯一致。

5. 我能掌握菜单栏、工具栏、画布和可移动区域每一个板块的位置和作用，理解其中包含的元素的含义和功能，快速解决问题。

6. 页面之间的跳转是符合思维常理的，菜单栏和工具栏的分类以及每一类的下属是合理的。

7. 软件在线可以免安装，离线版安装过程快捷；软件注册方式多样，注册过程流畅。

8. 我能对菜单栏、工具栏、画布和可移动区域每一个板块的位置进行不同程度的调整，可对几何对象进行返回、删除或修改等操作。

9. 当我出现错误时，我能通过提示或帮助及时发现错误并改正。

10. 在我不小心离开画板想要重新返回时，画板能恢复到我离开前的状态。

11. 我初次使用时，能在短时间内掌握基本工具的操作。
 12. 再次使用时，我能回忆操作步骤，及时上手，并能独自完成任务、举一反三。
 13. 通过快捷键可以减轻我的工作量。
 14. 一些简单的分类可以提高完成任务的效率，如当操作对象太多时，通过对象列表能快速找到操作对象。
 15. 我能通过文字、图片等信息感知操作对象的状态，如我能确定我是否选中了某一对象、几何对象此时的几何性质。
 16. 我在使用画板过程中感觉是轻松的愉悦的、实用的、便捷的、有趣的，能激发我对数学的兴趣。
 17. 软件没有透露我的个人信息，对隐私的保护做的很好。
 18. 软件持续更新，会及时上新资源、修复问题、优化界面、增加功能。
 19. 能保存、修改、分类、加密个人学习资源，也能评论、收藏、下载他人的资源。
 20. 有在线客服及时答疑。
 21. 和其他常用办公软件无缝对接，多个资源可组装。
 22. 可及时与他人分享个人的学习资源，且分享方式轻松、多样。
 23. 有网络社群，可方便用户之间进行交流。
 24. 软件可以用鼠标或者参数使操作对象动态变化，但几何性质保持不变。
 25. 软件可以直观展示抽象的数学问题，通过观察就能了解该问题的数学本质。
 26. 软件在几何方面具有强大的功能，如几何画图、几何推理、图形变化等，可以满足几何教学要求。
 27. 软件在概率统计方面有强大的功能，可以轻松完成数据和图表的绘制、分析。
 28. 软件在代数计算上有强大的功能，如数值计算、符号计算等。
 29. 对于网络画板的用户体验设计，您还有其他的建议：
-

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] J. Wang, Y. Rao*, R. Chen, H. Guan, Y. Wang, X. Shi. The Iteration Function on NetPad. The 14th International Conference on Computer Science & Education. IEEE, 2019:439-443. (EI)
- [2] J. Wang, L. Zhang, C. Li, R. Cai, W. Chen, Y. Rao*. Research on the Evaluation of Dynamic Mathematics Software Based on User Experience. The 15th International Conference on Computer Science & Education. IEEE, 2020:445-450. (EI)
- [3] L. Xie, J. Xiong, J. Wang, Y. Wang, Z.Cui, Y. Rao. Design and Application of the Ruled Surface Function in NetPad. The 4th International Conference on Education and Multimedia Technology. ACM, 2020:100-106. (EI)
- [4] R. Cai, Y. Rao*, J. Wang, H. Guan, X. Shi, Y. Wang. NetPadBrowser: An Offline Browser for Web-Based Dynamic Geometric Resources. The 14th International Conference on Computer Science and Education. IEEE, 2019:434-438. (EI)

致 谢

时光荏苒，光阴不再，三年时光匆匆流过，很幸运来到广州大学度过了人生最美好的时光，让我变得更加成熟、更加积极上进，有了人生新的目标。在即将离开学校的时刻，有太多的不舍与感慨，在此感谢所有关心和帮助我的人。

首先感谢我的导师张景中院士，张院士拥有渊博的专业知识，严谨的教学态度，前沿的学术思想，让我受益匪浅，谨此向先生致以我最崇高的敬意和最衷心的谢意！特别感谢饶永生老师，亦师亦友，一直帮助我，指引我前进的方向，从选题到答辩一直悉心指导我，耐心给我建议。感谢学院邹宇老师、陈联老师、强小利老师以及石晓龙老师，感谢你们一直关心和帮助我们。感谢李龙飞老师、吴晓波老师、巫侠老师、孙梦恬老师、林婷老师和吕思颖老师对我们的照顾，一直默默地照顾我们。

感谢团队师兄师姐和师弟师妹们，感谢管皓师兄、陈如仙师姐和石晓红师姐给予的帮助，感谢你们带领我们学习、运动和玩耍；感谢蔡瑞琦、谢兰星、陈婉薇、王剑雄、周启新、陈宁馨、麦策同学，和你们一起学习很快乐。感谢实验室师兄师姐和师弟师妹们，和你们一起学习我受益匪浅。

感谢舍友张国兰、仲启玉、周俊莲、吴丽苏、古星月，因为有你们 622 变得更加温暖，让我研究生的生活也充满了家的感觉。

衷心感谢答辩委员会的各位老师，感谢他们百忙之中审阅我的论文，为我指点迷津！

最后感谢我的家人们，在一起走过的艰难日子里，你们一直为我遮风挡雨，你们是最温暖的港湾，包容我、理解我和支持我，你们也是我坚强的后盾，给我前进的勇气，衷心祝福他们身体健康，永远幸福快乐！