

基于相关性分析的个性化实验项目自动生成系统^{*}

吕梦平¹, 冷爱莲¹, 段斌¹, 钟舒阳², 章兢¹

(1. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105

2. 德州仪器半导体技术(上海)有限公司, 上海 200120)

摘要:针对开关电源实验项目单一, 教学效果不佳等问题, 提出了一种基于相关性分析的电源个性化实验项目自动生成方法. 依据电源管理复杂工程问题的特征点, 在充分研究电源管理实验套件(PMLK)中每个实验的基础上, 挖掘出电源中各因素之间的相互约束关系; 使用仿真数据构建了电源管理中各因素之间的相关性系数表; 运用贝叶斯网络, 依据前期作品可观察数据进行认知诊断, 找出知识或能力的弱项; 最后, 基于相关性系数表使用Java语言开发了一个电力电子电源实验项目自动生成系统, 以“负载电流对效率的影响分析及优化设计”为例, 结合题目设计电源并实验测试, 通过分析实验结果验证了项目的适用性.

关键词:项目自动生成; 人工智能; 电力电子; 工程教育

中图分类号: TP181

文献标识码: A

文章编号: 1000-5900(2018)06-0063-09

DOI: 10.13715/j.cnki.nsjxu.2018.06.007

Personalized Experiment Topic Automatic Generation System Based on Correlation Analysis

LV Meng-ping¹, LENG Ai-lian¹, DUAN Bin¹, ZHONG Shu-yang², ZHANG Jing¹

(1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105;

2. Texas Instruments Semiconductor Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200120 China)

Abstract: Aiming at the problem that the switching power supply experiment project is single and the teaching effect is not good, an automatic generation method of power personalization experiment project based on correlation analysis is proposed. According to the characteristics of power management complex engineering problems, based on the full study of each experiment in the power management experiment suite (PMLK), the mutual constraint relationship between various factors in the power supply is excavated. Using the simulation data to construct a correlation coefficient table between various factors in power management; Using Bayesian network, based on the observable data of the previous works for cognitive diagnosis, to find the weakness of knowledge or ability. Finally, based on the correlation coefficient table, a power electronic power supply experiment project automatic generation system was developed based on the correlation coefficient table. Taking “the analysis of the influence of load current on efficiency and optimization design” as an example, the applicability of the problem is verified by analyzing the experimental results.

Key words: automatic generation of items; artificial intelligence; power electronics; engineering education

2016年,我国正式成为《华盛顿协议》缔约成员国,国内高校开始对教育体制进行改革,按照国际标准培养工科类学生,提高未来工程技术人才的质量.在电力电子课程教学过程中,课程实验体现了理论与实践的结合,是检验学生对理论知识的掌握程度,培养学生实践能力的重要环节^[1-2].在传统的实验教学过程中,整班学生通常只做同样的实验项目.这样的模式存在很大的不足,教师不能根据学生的薄弱环节,针对性的给学生分配实验.这样,一方面教师不能达到预期教学效果,

^{*} 收稿日期: 2018-11-19

基金项目: 湖南省普通高等教育教学改革研究项目

通信作者: 冷爱莲(1969—),女,湖南 益阳人,讲师. E-mail: 517128654@qq.com

另一方面学生的薄弱环节得不到加强训练,已经掌握的环节却被反复训练,造成精力浪费。

文献[3]分析了电力电子课程实验的作用以及重要性。文献[4-5]提出了对教学实验改革的建议,但仅针对实验方法,实验过程,实验结果等方面,不能针对性地培养学生的能力。基于相关性分析的个性化项目自动生成系统,教师只需在系统中选择相应的性能指标,系统将会给出相关的个性化题目,保证每个学生拿到的实验项目都是根据自身情况而设计的。学生依据电源相关知识,自主设计实验,并进行一系列的测试,分析解释数据并得到有效结论,从而加强训练了自己的薄弱环节。

本文针对当今电力电子教学实验项目较少,学生不能根据自身情况针对性的做实验等问题,研究并分析了 PMLK 中各实验间约束关系;然后,通过 WEBENCH 仿真得到数据,再利用 SPSS 软件对电源的各因素与性能指标进行了相关性分析;最后,采用 Java 语言开发了个性化项目自动生成系统,并以自动生成的项目——负载电流对效率的影响分析及优化设计为例,通过设计电路并测试,证明了生成的项目是可行的。

1 开关电源设计认知模型设计

1.1 开关电源设计认知模型

在开发项目生成系统之前,需要构建一个电源设计的系统模型,为系统提供一个模板,PMLK 是美国德州仪器公司针对其大学计划而设计的一款电源管理实验套件,它代表着电源领域的专家知识,本身也是一个典型的复杂工程问题^[6]。在分析 PMLK 中的每个实验的基础上,构建出了一个开关电源设计的认知模型。

开关电源设计认知模型如图 1 所示,该模型是将内容按特定信息组织成结构化的表示形式,表示设计者如何思考和解决测试问题。它包含三种类型的数据:问题与场景,信息源和特征。这三种数据类型在认知模型中被分为三个独立的层次。中间层次指定了相关的信息来源,信息来源可具体到一个特定的问题也可以是通用问题,从而适用于许多类型的问题或场景。第三层突出了项目显著特征,其中包括元素和约束条件。元素包含于约束关系当中,可以为题目指定内容。约束关系的作用是在内容组建的过程中加以限制,以确保生成有意义的项目^[7-8]。

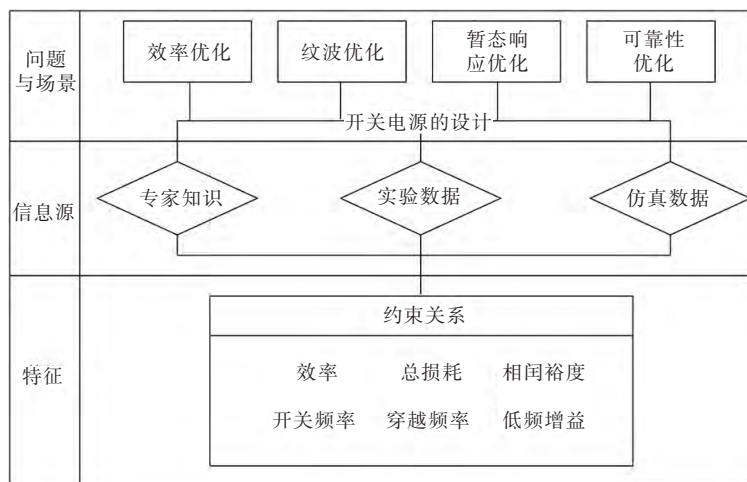


图 1 开关电源设计认知模型

Fig.1 Switching power supply design cognitive model

1.2 实验项目间的约束关系

在认知模型的第三层,需要给出实验项目生成设置规则,目的在于确保生成实验项目的有效性

和可靠性^[9-10],此规则就是所谓的约束关系。依据电源复杂工程问题的特征,即多因素之间有冲突,彼此之间有约束,文章基于 PMLK 挖掘出了各个实验之间的相互约束关系,总结出一张约束关系表。因约束关系表篇幅过长,此处只列出部分约束关系,如表 1 所示。

表 1 部分实验之间的相互约束关系

Tab. 1 Mutual constraint relationship between experiments

实验	实验 1	实验 2	实验 3
实验 1	11	12	13
实验 2	21	22	23
实验 3	31	32	33

注:其中如“21”表示实验 2 对实验 1 的约束关系,以此类推。

21: 输入电容 C_{in} 、输出电容 C_{out} 有功率损耗,所以 C_{in} 、 C_{out} 对效率有影响,纹波对效率也有影响。

12: 负载电流、开关频率改变会对输入电流纹波有影响,输入电流纹波与负载电流成正比,与开关频率成反比。

31: 开关频率对功率组件有损耗,所以设置开关频率的同时会对效率有影响。

13: 输入电压对负载暂态响应有影响,输入电压越大负载暂态响应就越差。

32: 设置开关频率对电感电流纹波有重大影响,频率越高纹波越小。

23: 开关频率和输出电压都会对负载暂态响应有影响。

1.3 信息源数据产生

表 1 已经给出各实验之间的相互约束关系,但仅是一种宏观的表示方法。需将这些约束关系转换成数据的形式,作为图 1 中第二层的信息源。信息源中的数据通过在 WEBENCH 中搭建电源仿真系统,并经实验测试仿真得到,部分数据如表 2 所示。

表 2 WEBENCH 仿真数据

Tab. 2 WEBENCH simulation data

约束关系	电流/电压	效率	输出电压纹波/mV	电感电流纹波/mA	总损耗/W
负载电流	0.5 A	0.910 88	175.776 00	1.172 00	0.385 58
对各指标	2.2 A	0.830 28	211.520 00	1.410 00	1.484 00
的影响	4.0 A	0.717 57	241.761 00	1.812 00	2.945 00
输入电压	6 V	0.921 47	101.256 00	0.675 04	0.281 30
对各指标	30 V	0.832 59	208.927 00	1.393 00	0.633 00
的影响	50 V	0.753 36	220.324 00	1.469 00	1.080 00

1.4 皮尔逊相关性分析

基于 PMLK 电路中各实验之间的约束关系,将信息源中的数据,通过皮尔逊相关性分析得到各因素与性能指标间的关联度。相关性计算方法为,设两个变量 X 和 Y ,这两个变量之间的皮尔逊相关系数可定义为两个变量之间的协方差和标准差的商,即

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (2)$$

式中: E 、 μ 表示数学期望,即均值; σ 表示标准差; cov 表示协方差^[11-12]。

基于仿真数据,采用 SPSS 软件进行数据处理,得到各因素与性能指标之间的皮尔逊系数表,如表 3 所示.

表 3 各因素与性能指标之间的相关性系数表
Tab. 3 Correlation coefficient between factors and performance indicators

	效率	输出电压纹波	电感电流纹波	总损耗	穿越频率	相位裕度	低频增益
输入电压	-0.321	0.536	0.927	0.893	0.719	0.815	0.885
负载电流	0.986	0.861	0.861	0.998	0.986	0.892	-0.975
开关频率	-0.981	-0.949	-0.981	0.978	0.981	-0.882	0.893
输入电容	-0.330	0	0	0.209	0	0	0
输入电容的等效电阻	-0.204	0	0	0.993	0.517	0.517	0
输出电容	0.718	0.717	0	0.718	0.244	0.901	0
输出电容的等效电阻	-0.878	0.875	0	0.873	0.776	0.954	0

表 3 中的数字为皮尔逊相关系数,一般地, $0.8 < r \leq 1.0$ 为极强相关, $0.6 < r \leq 0.8$ 为强相关, $0.4 < r \leq 0.6$ 为中等程度相关, $0.2 < r \leq 0.4$ 为弱相关, $0 \leq r \leq 0.2$ 为极弱相关或无相关.

2 基于贝叶斯心理测量模型的认知诊断

贝叶斯心理测量模型是一种以证据为中心(ECD)的评估模式,包括熟练度模型、任务模型和证据模型^[13]. 基于贝叶斯心理测量模型的认知诊断方法可以评估出学生对电源涉及的各个知识点的掌握情况,评估结果为教育者提供参考. 教育者根据学生对知识点的掌握情况,利用项目自动生成系统生成针对性的实验项目给学生,帮助学生加强训练.

2.1 电源设计 ECD 框架

开关电源中的 ECD 框架体系由熟练度模型、证据模型和任务模型构成,如图 2 所示. 其中,熟练度模型依据电源复杂工程问题特征点、工程教育专业认证华盛顿协议知识和能力要求、CDIO 教学大纲等三种工程教育标准构建,它们代表了与学生掌握的知识、技能等密切相关的潜在变量,可根据情况分为不同的等级;证据模型表征了学生与电源本身的关键特征,为熟练度模型提供证据,并依据贝叶斯网络推理知识得到证据模型中潜在变量达成的概率;任务模型是一种通用框架,用于设计符合熟练度模型中某些证据要求的任务,每个任务是任务模型的实例化^[14]. 任务模型描述了应该设计什么样的实验任务来获得证据模型中所需要的证据.

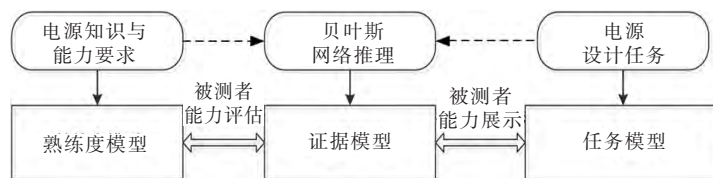


图 2 电源设计的 ECD 评价体系

Fig.2 ECD evaluation system for power supply design

2.2 贝叶斯网络推理

学生的能力受多方面的因素影响并且是不可观测量,贝叶斯网络具有强大的不确定性事件处理能力,通过贝叶斯推理可将学生的能力以概率的形式表征^[15-16].

在图 2 的熟练度模型中,设熟练度模型变量 θ 受 λ 参数的影响,可观测量 X 受 η 参数的影响,其中 λ, η 为超参数. 似然概率分布集记为 π ,根据这些参数与变量间的独立性,它们的联合概率分布为

$$P(\lambda, \eta, \theta, \pi, X) = p(\lambda) \times p(\theta | \lambda) \times p(\eta) \times p(\pi | \eta) \times p(X | \pi, \theta). \quad (3)$$

首先依据学生的平时测验成绩确定学生对各个知识点掌握的概率,再确定熟练度变量与参数的先验概率及似然概率,贝叶斯推理的目标是求解观测到 X 值的条件下,其他参数与变量的后验概率,即

$$P(\lambda, \eta, \theta, \pi | X) \propto p(X | \pi, \theta) \times p(\theta | \lambda) \times p(\lambda) \times p(\pi | \eta) \times p(\eta), \quad (4)$$

式中, $P(\lambda, \eta, \theta, \pi | X)$ 是不可观测参数和变量的后验概率分布.

其中,似然概率由心理学测量理论等级反应模型确定,即

$$P(X_{ij} \geq k) = \text{logit}^{-1}(a_j(\theta_i - b_{jk})), \quad (5)$$

式中: a_j 为总任务中第 j 个任务的区分度; b_{jk} 为第 j 个任务的等级 k 的难度. 在任务 j 中评估熟练度等级为 k 的似然概率为

$$P(X_{ij} = k) = P(X_{ij} \geq k) - P(X_{ij} \geq k + 1). \quad (6)$$

任务模型中观测和计算的证据,即可观测变量,需经贝叶斯推理方法得到知识与能力掌握程度的概率,即

$$p(\theta | X) = \frac{p(\theta)p(X | \theta)}{p(X)}, \quad (7)$$

式中: θ 表示熟练度模型变量; X 表示可观测变量; $p(\theta)$ 指学生熟练度变量的先验概率; $p(X | \theta)$ 反映了在给定的熟练度 θ 情况下可观测变量 X 的可信度,即似然概率; $p(X)$ 指标准化常量,指在 θ 取遍所有可能值的条件下得到可观测值 X 的概率的平均值; $p(\theta | X)$ 表示观测到数据 X 后的熟练度变量 θ 的后验概率.

在具体实施中,通过一套试卷的考试或工具软件的仿真,或者对前一阶段实验数据的收集,完成认知诊断,找出知识或能力的弱项,服务于个性化的实验项目自动生成. 因篇幅所限,该部分具体内容将由另外的论文介绍.

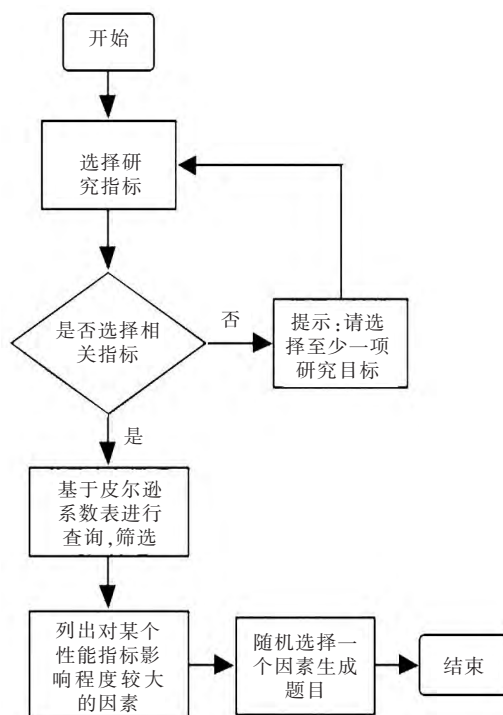


图3 系统的实现流程

Fig.3 Implementation flow of the system

3 实验项目自动生成系统设计与实现

3.1 系统设计实现流程

智能系统的实现流程如图 3 所示,智能系统的设计目的是自动生成实验项目,它是使用计算机技术通过算法生成项目的过程。基本思路是:在系统输入界面选择研究电源的指标,计算机基于表 3 中的皮尔逊系数,依次查询每项研究指标与外部条件的关联程度,输出查询结果。系统将系数表中的皮尔逊系数大于某个阈值时对应的约束条件筛选出来,作为内容生成新的个性化项目。

3.2 系统功能实现结果

智能系统在 Eclipse 开发环境中采用 Java 语言编写实现。其系统输入界面如图 4 所示。例如,教师只需在输入界面选择“效率”指标。系统基于皮尔逊相关性系数表查询得出负载电流,输出电容等效电阻,开关频率这三个因素对效率的影响最大。此时,系统中的随机函数随机选择其中一个因素来生成个性化项目。项目生成情况如图 5 所示。

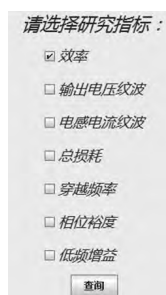


图 4 输入条件选择

Fig.4 Input condition selection

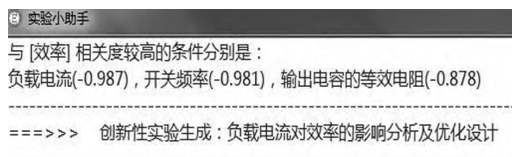


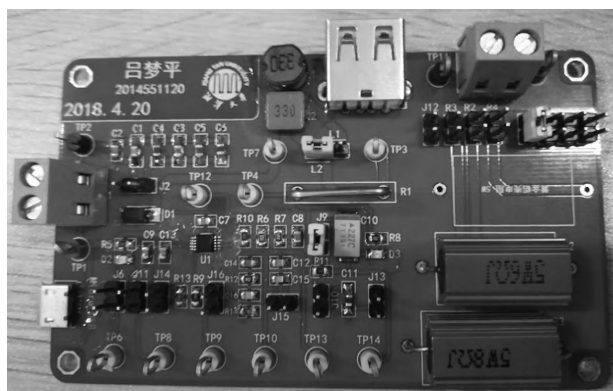
图 5 开关电源实验项目自动生成

Fig.5 Automatic generation of experimental items in switching power supply

4 实验项目可靠性分析

4.1 电路设计

为了验证实验系统生成项目的正确性,文章以系统生成的项目“负载电流对效率的影响分析及优化设计”为例,根据题目设计电路,通过对设计出的电路进行仿真和实物测试来证明生成的项目有效可靠。以 TPS54160 为核心控制器,PCB 实物制作和外围电路原理图设计如图 6 和图 7 所示。



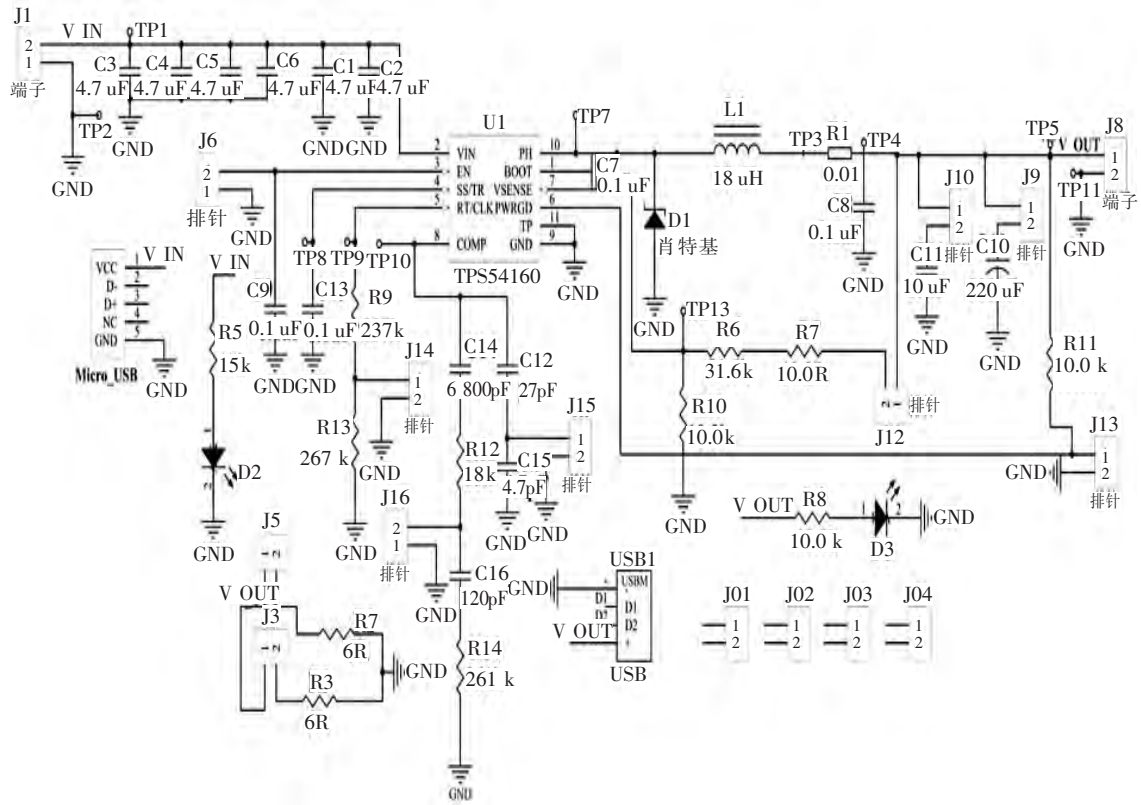


图7 整体电路设计

Fig.7 Overall circuit design

4.2 数据结果分析

在设计出的 PCB 实物上进行效率测试,通过理论计算,实验可以得到不同负载电流下对应的效率,实际效率通过 $\eta_{\text{exp}} = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$ 得到,其中 $P_{\text{out}} = I_{\text{out}} U_{\text{out}}$, $P_{\text{in}} = I_{\text{in}} U_{\text{in}}$. 理论效率通过 $\eta_{\text{theo}} = (P_{\text{total}} - P_{\text{loss}}) / P_{\text{in}}$ 得到, P_{total} 是总功率, P_{loss} 是理论损耗功率,理论损耗功率计算公式如下:

(1) 传导损耗:

$$P_{\text{MOSP}} = R_{\text{ds}} D I_{\text{out}}^2 \alpha_{\text{pp}}, \quad (8)$$

$$P_{\text{二极管}} = V_{\text{f}} D' I_{\text{out}}, \quad (9)$$

$$D' = 1 - D. \quad (10)$$

(2) 开关损耗:

$$P_{\text{MOS,SW}} = V_{\text{in}} I_{\text{out}} f_{\text{s}} t_{\text{sw}}. \quad (11)$$

(3) 栅极驱动损耗:

$$P_{\text{MOS,g}} = Q_{\text{g}} V_{\text{dr}} f_{\text{s}}. \quad (12)$$

(4) IC 电流感应损耗:

$$P_{\text{sns}} = R_{\text{sns}} D I_{\text{out}}^2 \alpha_{\text{pp}}. \quad (13)$$

(5) 电感绕组损耗:

$$P_{\text{L,w}} = ESR_{\text{L}} I_{\text{out}}^2 \alpha_{\text{pp}}. \quad (14)$$

(6) 电感磁芯损耗:

$$P_{\text{L,c}} = K_1 f_{\text{xs}} (K_2 \Delta i_{\text{pp}})^V. \quad (15)$$

(7) 输入电容损耗:

$$P_{\text{Cin}} = ESRC_{\text{in}} I_{\text{out}}^2 D' D. \quad (16)$$

(8) 输出电容损耗:

$$P_{\text{Cout}} = \frac{1}{12} ESRC_{\text{out}} \Delta i_{\text{pp}}^2. \quad (17)$$

(9) IC 偏置:

$$P_{\text{IC}} = V_{\text{in}} I_{\mu}. \quad (18)$$

定义: T_s 为开关周期; t_{ON} 为 MOSFET 导通时间; $f_s = 1/T_s$ 为开关频率; D = MOSFET 占空比:

$$t_{\text{ON}}/T_s = V_{\text{out}}/V_{\text{in}}. \quad (19)$$

R_s = MOSFET 为导通电阻; Q_g = MOSFET 栅极电荷; T_s = MOSFET 开关时间; V_f = 二极管正向压降; L = 电感值; ESR_L = 电感等效串联电阻; $ESRC_{\text{in}}$ = 输入电容等效串联电阻; ESR_{out} = 输出电容等效串联电阻; I_u = 控制器静态电流; V_{dr} = MOSFET 栅极驱动器电压.

电感电流纹波:

$$\Delta i_{\text{pp}} = V_{\text{out}} D' / (f_s \cdot L). \quad (20)$$

电感纹波系数:

$$\alpha_{\text{pp}} = 1 + (\Delta i_{\text{Lpp}} / I_{\text{out}})^2 / 12. \quad (21)$$

通过理论计算, 实验得到的效率的数据如表 4 所示.

因上述损耗计算公式中的部分参数与元件的型号, 工艺和厂家等因素有关, 所以在理论损耗计算过程中会存在误差, 但表 4 中的数据表明理论效率大于实际效率, 已能够说明问题.

表 4 理论和实验的效率数据

Tab. 4 Theory and experimental efficiency data

I_{out}/A	0.2	0.5	1.0	1.2	1.5
η_{theo}	91.86	90.67	86.60	85.12	81.42
η_{exp}	89.72	88.91	84.78	82.85	78.93

从表中数据可看到实验效率要比理论效率低, 因为实际效率受 PCB 布线阻抗, 环境温度, 以及测量仪器误差等因素的影响. 通过对表 4 的数据进行分析, 表明基于自动生成的实验项目而设计出的电路是可用的, 进而说明实验项目具有较高的正确性和可靠性.

5 结论与展望

本文从工程教育背景出发, 基于贝叶斯心理测量的方法诊断出学生对知识点的掌握情况, 再开发出一套个性化项目自动生成系统, 此系统可以帮助教育者结合学生实际情况, 为其生成个性化的实验项目, 针对学生的薄弱环节进行加强训练及巩固, 此方法具有较高的研究意义.

现阶段的智能系统, 还有很大的提升空间, 例如在生成项目的支持度方面需要更多的电源领域知识和约束关系, 来构建更大更全的皮尔逊系数表, 这样就可以生成更多更精确的题目. 此方法还可扩展到其他工程专业领域.

参 考 文 献

- [1] 唐贤伦, 罗萍, 严冬. “电力电子技术课程设计”过程规范化的探索与实践[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(12):145-147.
- [2] 孙佳, 齐文娟, 黄梓昂. 电力电子课程设计实践平台的构建[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(10):244-247.
- [3] 王明彦. “电力电子技术”实验环节开展研究性教学的探索[J]. 中国电力教育, 2009(5):137-139.

- [4] 潘海鹏,雷美珍,夏永明,等. “电力电子技术”课程实验教学改革与探索[J]. 合肥工业大学学报(社会科学版), 2010, 24(1):105-108.
- [5] 邢岩,刘建宏,龚春英,等. 科研推动电力电子技术课程实践性教学改革[J]. 电气电子教学学报, 2006, 28(5):81-84.
- [6] Nicola F. Power management lab kit buck experiment book [M]. Texas Instruments,2016.
- [7] Gierl M J, Lai H. Using automatic item generation to create solutions and rationales for computerized formative testing[J]. Applied Psychological Measurement,2018,42(1):42-57.
- [8] Lai H,Gierl M J,Touchie C,et al. Using automatic item generation to improve the quality of MCQ distractors [J]. Teaching & Learning in Medicine,2016,28(2):166-173.
- [9] Gierl M J, Haladyna T M. Automatic item generation: theory and practice[M]. New York:Routledge,2012: 1-459.
- [10] Gierl M J, Lai H. Instructional topics in educational measurement (items) module: using automated processes to generate test items[J]. Educational Measurement Issues & Practice, 2013, 32(3):36-50.
- [11] 唐伟斌,李涛,邹品晶,等. 基于皮尔逊相关系数的电网夏季空调负荷预测研究[J]. 电力需求侧管理,2017(6):11-17.
- [12] 李宏彬,赫光中,果秋婷. 基于皮尔逊相关系数的有机质谱相似性检索方法[J]. 化学分析计量, 2015, 24(3):33-37.
- [13] Levy R, Mislevy R J. Bayesian psychometric modeling[M]. Chapman and Hall/CRC, 2016:18-24.
- [14] Williamson D M, Bauer M, Steinberg L S, et al. Design rationale for a complex performance assessment. [J]. International Journal of Testing, 2004, 4(4):303-332.
- [15] 武静,张鑫. 基于贝叶斯网络的景观设计途径的推送检验模式[J]. 湘潭大学自然科学学报,2016,38(3):99-104.
- [16] 周俊梅,蒋文江. 基于单方程计量经济模型的贝叶斯分析[J]. 湘潭大学自然科学学报,2013,35(2):119-122.