PMET方法：基于斯特林发动机产品的高校工程训练项目

清华大学基础工业训练中心 张秀海，王德宇，王佐等

摘要：本文中讨论了一种基于项目设计挑战式工程训练课程的方法，强调了将产品过程管理整合融入到工程训练教学环节之中。背景：以产品为导向设计课程任务和学习目标，将矩阵式管理应用到学生团队和教师的组织中，使得学生能够个性化定制自己的学习过程和重点内容。方法：1）PMET方法，并行式训练课程单元，学生可以自由选择，以此加强同组内不同学习内容的差异，增强学生之间的交流；2）建立产品为导向的学习目标，加强学生团队之间的联系；3）将项目管理，过程管理的工具整合进课程，例如，运用CAD、PDM等系统进行产品设计与过程管理，将学习进程可视化，便于学习者和指导教师了解学习进度。结论：课程中的调查及课后学生反馈表明，学生更加主动地进行学习，参与度更高。产品中也更好地体现了学生的产品创意。结果还表明，对于实践课程教学设计，PMET方法能够更有效地加强学生合作学习的意愿，建构自我知识体系。

关键词：工程训练 产品开发 矩阵式团队管理 挑战式学习 项目管理

1 导言

工程训练或工业训练是国内工科高校培养学生基本工程知识与工程素养的重要环节。近年来高速发展的自动化、信息化等工业新技术正在彻底改变产业结构与制造模式，高校工程人才培养也需要面向新的产业发展方向进行改变和更新，从而应对未来产业升级所面临的新挑战与新问题。如今的工程训练将更加注重工业系统观，以及更广的眼界、更强的团队合作能力等[1]。

结合工程训练课程中的先进制造环节，我们应用了一种全新的设计方法，来开发基于斯特林发动机产品的综合性工程训练环节。学生在以团队为单元进行实践学习的过程中，了解产品的组成与工艺构成，并对不同工艺进行学习实践，从以工艺为导向转变为以产品为导向的工程训练。在这样的形式下，学生能够在产品加工装配流程、进度管理、质量工程等方面进行一定的自主化设计，将传统独立的制造工艺实习进行融合，进而拓展出对分布式数字化控制，产品生命周期管理等内容。同时借助这些数字化工具，学生的学习过程进行了记录，便于教室进行分析，实现教学质量可控。

1.1 工程训练课程现状

当前的工程训练课程体系主要以基于工艺的模块组成，经过多年的演化，在训练学生工程技能与素养方面具有较大的优势。传统工程训练体系包括十个不同的工艺单元，如车工、铣工、钳工、铸造、焊接等，每个工种持续一至两天，由学生进行动手操作。近年来引进的数控设备，也更新了包括车工、铣工、焊接、特种加工等工艺，并融入了CAD与CAM的知识内容。然而，相比当前产业广泛应用的数字化制造系统而言，基于工艺的工程训练课程，已经不能满足培养清华学生面向当前产业需求的工程能力的要求，亟需通过基于现有条件，升级工程训练课程体系，来加强不同工艺之间的联系，改善系统性，提升对学生综合工程素养培养的水平[2]。

从学生的角度来看，以工艺为导向的工程训练教学内容，在系统性上的欠缺，使得学生难于对不同工艺在产业中实际应用，以及组成的工业系统，进行整体性的了解和认识。学生参与实践学习的过程，缺少自主创新的成分，从而对学生的课程参与度有所影响。根据每个学期定期的课程调查，学生也普遍反应实习过程中产品创新的缺失。另一方面，对工艺之间联系，甚至更高层次对工业系统的认识，也是传统工程训练有所欠缺的。学生在实践学习的过程中，更多关注工具操作技能本身，而对团队能力、问题发现、沟通能力、批判性思维等培养有所缺失[3]。在指导过程中，教师水平的差异对教学内容以及教学质量的影响是较为显著的，对于整体提升学生培养水平不利[4]。

1.2 基于产品的工程训练环节设计

根据以往经验改进的工程训练教学内容组织方法，旨在加强学生除基础工具运用技能之外的其它能力的培养，并拓展对于制造业的整体性认识，加强对数控技术使用的训练和理解。教学内容设计方法主要具有以下特点：1）基于一个特定产品进行设计，2）产品开发结合制造执行系统（MES），3）主要由数控加工工艺构成，4）以团队为单位组织学生，5）挑战式教学。基于这些特点，这类新型教学内容设计方法被称为整合过程管理与项目管理的工程训练（PMET）。

在2014年及2015年夏季学期工程训练课程中，基于本方法开发了两套教学内容，对象分别为三种定制工艺品和斯特林发动机。两个学期的课程内容都是基于数控加工技术进行设计的，包括数控车、数控铣、激光加工、3D打印、线切割，以及激光内雕。每个课程单元持续3天，参与学生为30人。学生分为六组，每组五人。六组学生分别分散到6个加工实验室，由两位指导教师负责指导和监督学习进度。产品设计制作期间，学生使用PDM系统来维护过程数据。在完成部分零件的加工，以及整体产品的装配调试后，学生在第三天下午对三天学习的内容进行展示，包括一系列工程技术文档、产品设计介绍、以及产品量产化设计思路，以及工作现场6S评估报告。学生评分为综合性评价，每位学生的评分由小组分数和个人分数组成。三天学习结束前，学生还将分为六人一组，按照635方法进行研讨，汇报学习过程中的问题并提出改善意见。研讨采用书面头脑风暴的形式，确保每个学生有平等的发表意见的机会。

**表1** 产品对应部件及工艺组成

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年度 |  | 数控车 | 数控铣 | 激光切割 | 3D打印 | 线切割 | 激光内雕 |
| 2014 | **工艺钟表** | 钟表支架 | - | 表盘 | - | 表针 | - |
| **艺术台灯** | 底座 | 插槽 | 侧面板 | 台灯顶 | - | - |
| **纪念奖杯** | - | 铭牌 | - | 底座 | - | 奖杯 |
| 2015 | **斯特林发动机** | 轴承 | 底座 | 收纳展示盒 | 气缸保护罩 | 连杆 | - |

2 条件与课程设计方法

2.1 学生情况

2014年，278名学生选修了以PMET方法设计的工程训练课程。96.8%的学生为大一升大二学生，2.9%为大二升大三学生，一名学生为毕业班学生。全部学生没有工业实习经验。学生来自工程科系，理学系，详情见表2。

**表2** 不同专业学生比例

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年度 | 专业 | 航院 | 汽车 | 工业工程 | 机械 | 材料 | 化学 | 工物 | 电子 |
| 2014 | **数量** | 90 | 79 | 71 | 31 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| **比例（％）** | 32.4 | 28.4 | 25.5 | 11.2 | 1.1 | 0.7 | 0.4 | 0.4 |
| 2015 | **数量** |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **比例（％）** |  |  |  |  |  |  |  |  |

2.2 教学资源与学习目标设置

本文阐述的课程教学实践环节，是基础工业训练中心工程训练课程中的一部分。工程训练则为若干院系教学大纲中的必修课程。根据课程总体进度安排，基于产品的先进制造实践环节为期3天。

六个技术单元，分别由一名实习指导教师和至少一名实验指导人员组成，对应各个工艺。实验指导人员将向学生教授工艺特点，常见产业应用场景，常见问题及挑战等知识。学生团队则在教师的指导下，开展产品设计与加工组装。一名教师负责团队的进度控制，另一名实验指导人员则作为加工制作的导师。本环节中，学生产品的管理使用PDM系统进行管理，该系统配置在中心的一台服务器虚拟机上，由中心专门负责信息技术的工程师维护。

2.3 PMET方法

总结以往工程训练教学经验，并根据中心近年来在教学设备设施上的更新换代，以及教师教学思路的转变，2014年及2015年夏季学期的课程设计方案，依照PMET方法，进行挑战式教学与项目为导向教学方法的尝试，落实目标为导向（OBE）教学方法的实践。课程方案以两天半和三天的形式展开，包括了各加工工种的工艺技术讲座，实践环节，总结展示三部分。每个工种的工艺讲座持续1.5小时，集中在第一天进行，教学目标是向学生展示先进制造环节几类工艺的特点与适用范围，从而为后续进行零件加工和装配提供基本概念和原理的知识准备。

第二天的方案，30名课程学生被分为三至四人一组，每组经过教师介绍课程任务目标，工艺间轮换规则，成果评价标准，产品要求等，随即进行小组讨论，制定产品方案和工作计划，并在接下来的一天或一天半时间内完成。为了发挥出不同工艺的作用，同时加强组间交流与合作，在每个产品小组之外，学生还会根据各自认领的工艺，形成职能小组，深度学习相对应的工艺。实验技术指导人员将负责评估学生在工艺中的表现[5]。

在课程过程中，学生学习进程以产品开发过程为线索，并通过MES系统来管理产品数据及相关文档。此外，学生还需要准备一系列产品介绍材料，在完成产品后，介绍设计与实现的过程。最后的一个小时时间为团队交流环节，团队将调试完成的产品进行性能检测，由教师针对设计感、创意、性能等方面进行评价。同时，学生重新分成六人小组，通过635书面头脑风暴，提出对课程的改进意见。

3 结果

3.1 产品设计与实现

每个产品小组获得一套斯特林发动机基础套件，以及一套工具套件。对于缺失的关键零件，学生通过几种先进制造技术进行加工制作。在对于保护罩、收纳盒等部件，团队则具有较大的空间发挥创意设计，将喜爱的元素融合进产品设计中，同时满足工程设计需求。在产品零件加工制造过程中，每个小组利用本地PDM系统进行产品数据管理，教师则通过系统监控学生阶段性成果，及时发现问题并加以纠正。

3.2 学生参与度

相较传统工程训练以工艺为导向的课程设置，学生在以产品为导向的工程训练中，由于有更明确的目标，在第二天进行工艺学习时，始终较为忙碌，参与程度高。由于任务分工，个人进度会影响到小组整体装配调试进度，每个人的责任意识更强。产品小组有效约束了学生的学习进程。矩阵式团队管理，不仅加强了同工艺学生间的讨论，还促进了同产品不同工艺学生之间的合作。为了最终顺利装配运转，每个零件加工尺寸精度要符合规范，并且相互配合，这就为学生创造了一个真实的环境，来运用工程知识解决实际问题。

3.3 学生反馈

学生课后讨论和反馈表明，产品设计中，更强的定制程度，有利于学生学习的兴趣，进而提升学习效果。对于产品外观的定制有比较好的激励作用，而另一部分学生则对产品结构和功能进行深度定制，具有浓厚的兴趣。材料的选择也是学生希望进一步探索的方向之一，他们希望通过体验不同材料的加工，来了解它们各自的特点。此外，学生提出未来可以制作的产品包括，机器人、可编程控制的工艺品等。总体来看，学生希望能够在课程中完成复杂度较高，具有实际功能，机电一体化结合的产品。因此学生也期待类似产品为导向的课程，能够覆盖更多的工程训练环节。

4 讨论与结论

根据现场观察与学生课后反馈，PMET方法设计工程训练课程的目标均有效实现。产品管理融入到课程管理中，持续跟踪学生进程，能够有效提升教学质量，加强学生的综合素质训练效果。挑战任务中的多样性，通过项目得以增强，让学生的学习对象能够与实际产业应用的对象更为接近。

在这样的课程设计中，学生分组进行不同工艺的深度学习，随后结合产品进行跨工艺交流，这样既能够增强学生学习内容的综合性，也保持了传统工程训练的扎实基础。矩阵式学生团队管理模式是达到这一目标的重要手段。学生能够以项目团队完成产品设计与实现，同侪之间的压力能够促进学生有效自主学习[6]。与此同时，学生还会挑战同侪的思路或决策，在讨论过程中，更深层次的问题被挖掘出来，激发教师有针对性地进行答疑解惑和指导。另一方面，有学生指出，产品过于复杂，或是过于强调某一零件的加工或某一工艺，有时会浪费时间，局限学生的创新思路。同时，过多地给予指导，有时会不利于问题解决能力的培养[7]。因此，未来新的课程设计，将需要更深度地设计学生挑战的对象产品，在保证足够复杂度，涵盖教学大纲涉及的不同工艺的前提下，为学生提供更丰富，更多层次的定制化机会。

PMET方法设计的课程，对于教员提出了更大的挑战。如何满足学生对学习内容的期待，有效解答学生自主学习中探索的问题，成为教员备课过程中的重点。这意味着，我们需要运用社会力量，共同完成课程教学。在本课程实施过程中，我们通过两种途径来应对这一挑战。首先，通过学生自学能力的开发，加强学生众学的效果，让问题在产品组或职能组内，相互之间得以解决。在课程过程中我们发现，学生虽然刚刚接触相关工艺，但能够按规完成产品并达到指定技术要求。因此，下一步课程开发将探索如何引入成本控制的概念和交易、市场等机制，来进一步提升课程的综合性和真实性，并提升产品的质量。

跨学科合作也是加强学生参与度的重要途径之一。在工程训练课程群体学习的环境，围绕一个产品进行开发，不同学科知识的叠加效应将更加凸显[9]。下一阶段课程开发，将探索是否可以将文科学生引入工程训练，从而充分发挥多学科融合的优势。

学生评价机制对于学习过程有直接影响，本课程中，矩阵式管理使得学生成绩由工艺实践和产品开发两部分构成，学生的表现能够更为全面地得以体现。接下来课程设计团队将探索如何进一步设置合理的工程技能评价指标，来加强对每个学生实际操作技能的评价[10]。此外，更为综合性的评价机制将帮助学生形成好的工程素养和合作精神。

最后，对于课程开展质量的影响的另一关键因素是基础设施的建设。制造执行系统（MES）运用在教学中，还有很多可以改进的地方。学生课程时间有限，如何更好地提供一个简单易用且真实的产业系统，既可以将更多时间释放给学生进行实践学习，也能够提升学生的学习兴趣。因此我们接下来将开发一套应用于教学的工业系统，将产业中的系统进行合理抽象。此外，建立机床设备联网系统，能够更好地为学生提供面向中国制造2025的教学条件。信息化成的增强，也要依靠自动控制系统的运用，以及教员管理水平的提升[11，12，13]。

总之，学生能够根据分配的教学任务，更有意愿学习知识，并实践探索。一个良好的任务，明确定义的问题，能够引导学生寻找相应解决方案，这一过程中完成了工程训练要求的内容[14]。PMET方法将进一步完善改进，为将来开发更贴合产业发展、学生更喜爱的课程做出努力。

参考文献

1. UNESCO (2010) Engineering: issues, challenges and opportunities for development. Paris, France. ISBN: 978-92-3-104156-3

2. Hui J Z, Liu H M, Zou Y K (2009) Exploration of construction of modern engineering training center and training mode. Experimental technology and management, vol. 26, no. 3, pp. 115-118

3. Shazaitul A R, Maisarah M S (2012) The effects of industrial training on students’ generic skills development. Procedia - social and behavioral sciences, vol. 56, pp. 357-368

4. Ayşe B C (2002) Gateway to the real world, industrial training: dilemmas and problems. Tourism Management, vol. 23, pp. 93-96

5. Gareth J, Jennifer G (2004) Essentials of contemporary management, 1st edition. McGraw-Hill, ASIN: B004W4VY3M

6. Koo H Y, Wang D Y, Chou S Y, Yang F F, Lu D R (2013) Distributed learning workflow: an operating system integrated information technology and the real campus. Research in higher education of engineering, vol. 2, pp. 72-81, 89

7. Ding H S, Zhou C Z, Yang Z B, Wang Y M, Wan X L (2005) Reform and innovation in engineering training practical education system. Experimental technology and management, vol. 22, no. 6, pp. 1-4

8. Koo H Y, Zha J Z, Edward F C (2009) Four forces influencing the teaching service quality. Research in higher education of engineering, vol. 4, pp. 60-69

9. Ma P J, Wang L, Hu D M (2009) Establishing a multi-disciplinary engineering training platform of modern manufacturing, electronics and control science. Research in higher education of engineering, vol. 5, pp. 127-129, 160

10. Maisarah M S, Hamidah A R, Azizah R (2012) The impact of industrial training on ethical awareness and ethical judgment. Procedia - social and behavioral sciences, vol. 69, pp. 1676-1683

11. Li X H, Cao Z K, Chen L, Jiang Z Y (2011) Consideration on construction and development of university engineering training center. Procedia Engineering, vol. 15, pp. 4194-4199

12. Nordin J, Afida A, Siti A O, Mohd Z O, Norhisham T K, Suhana J (2013) Undergraduate industrial training experience: a win-win situation for students, industry and faculty. Procedia - social and behavioral sciences, vol. 102, pp. 648-653

13. Ayob A, Osman S A, Omar M Z, Jamaluddin N, Kofli N T, Johar S (2013) Industrial training as gateway to engineering career: experience sharing. Procedia - social and behavioral sciences, vol. 102, pp. 48-54

14. An L Q, Xu W, Tao B, Fan C J (2009) Exploration on the research-oriented practice teaching mode of mechanical engineering training. Research and exploration in laboratory, vol. 28, no. 6, pp. 143-145