机械工程师
资格认证工作通讯

2019 年第 3 期 总 55 期

（内部刊物 · 赠阅）
2019 年 10 月 30 日出版

主办：中国机械工程学会

地址：北京市海淀区首体南路 9 号
主语国际 4 号楼 11 层

邮编：100048

组稿：中国机械工程学会工作总部
教育与培训处

编辑：王　玲　陈　江
缪　云　秦　戎

编务：马　驰

电话：010-68799018

传真：010-68799050

Email：tongxun@cmes.org

网址：www.cmes.org

发行：中国机械工程学会工作总部

# 目录 CONTENTS

## 学会要闻

中国机械工程学会第十一届六次常务理事（扩大）会议在辽宁沈阳召开……1
全球翘楚共议人才培养 擘画未来工程教育蓝图
——2019 国际机械工程教育大会在沪举行 ……3
美国机械工程师学会代表团来访我会…… 11

## 工作动态

我会组织专家参加亚太工程组织联合会（FEIAP）第 27 届全体大会暨第 5 届国际学术研讨会…… 12
高等学校机械类专业实验实训设备与安全管理研讨会举办…… 17

## 地方资讯

2019 年工业工程暑期系列活动纪实 …… 18

## 专家观点

李培根：《工程教育的“存在”之道》…… 19

# 目录

CONTENTS

深度丨中国工程院提出新一代智能制造…… 25

## 经典案例

2D 数字伺服阀及其数字控制技术 …… 35
工程机械用多路阀数字化技术…… 43

# 中国机械工程学会第十一届六次常务理事（扩大）会议在辽宁沈阳召开

2019 年 7 月 13 日 -15 日，中国机械工程学会第十一届六次常务理事（扩大）会议在辽宁省沈阳市召开。中国机械工程学会理事长李培根，常务副理事长张彦敏，副理事长陈钢、林忠钦、郭东明，副理事长兼秘书长陆大明以及 40 位常务理事出席会议。27 个专业分会和 21 个省区市机械工程学会负责人以及工作总部相关部门负责人列席会议。参会代表共计 100 多人。

会议由李培根理事长主持。

张彦敏常务副理事长为全体参会代表讲了一堂“不忘初心、牢记使命”主题教育活动专题党课。报告立足学会工作实际，回顾了学会建会时“联络机械工程同志、研究机械工程学术、发展机械工程事业”的初心，分析了学会在我国建设科技强国、创新强国、质量强国的征程中应担当的使命，希望学会各位理事、常务理事、工作委员会、专业分会和省区市学会对照“初心”和“使命”，找差距、抓落实，担负起建设世界一流学会的历史使命，扎扎实实为建设一流学会打基础。

陆大明副理事长兼秘书长以“认准目标 全面推进 加快建设世界一流学会”为题做了学会 2019 年上半年工作报告。报告全面汇报了学会

李培根理事长主持会议

张彦敏常务副理事长讲党课

陆大明秘书长作 2019 年上半年工作报告

学术出版基金”的议案、专业分会委员会换届及届内调整变动、分支机构管理办法（草案）、会员管理条例（草案）、设立中国机械工程学会会员日、展览工作委员会工作条例及组成人员名单、筹建工业软件分会、游乐机械分会、极端制造分会、机械科技情报分会更名等 9 项议案。

讨论环节中，参会代表就理事履职、会员发展、会员活动等问题发表了建议和意见。

代表表决议案

各级组织 2019 年上半年在完成世界一流学会建设项目和学会五年事业发展规划中提出的重点任务中所做的工作，分析了学会在风险识别与防控、各级组织协作、内部治理等方面存在的问题，对 2019 年下半年工作的指导思想、方针措施和重点任务做了全面的部署。

会议审议并表决通过了筹备设立“机械工程

本次会议期间还召开了第十一届理事会第九次党委（扩大）会议和第十一届理事会第九次理事长办公会、标准化工作委员会（扩大）会议、学术工作委员会及青年工作委员会工作会议、展览工作委员会工作会议、分支机构负责人工作会议等多项专题会议，举办了中国机械工程学会走进辽宁创新助力活动。

（文章来源：工作总部，2019 年 7 月）

# 全球翘楚共议人才培养 擘画未来工程教育蓝图
# 2019 国际机械工程教育大会在沪举行

全球科技创新空前活跃，迅速变化的世界为工程及工程教育的发展提供了难得的发展机遇，同时也提出了更大挑战。面向未来的卓越工程人才该如何培养，教育界、产业界、科技界关于机械工程教育的最新理念和变革举措是什么？

10 月 25-28 日，工程教育界的盛事——2019 国际机械工程教育大会在上海举行。来自中国、美国、俄罗斯、英国、法国、德国、日本等十余个国家和地区的千余名工程教育从业者、企业界人士和政府教育管理者齐聚上海，以“面向未来的卓越工程教育”为主题，通过一系列活动，汇聚当前全球机械工程教育领军人物智慧，把脉机械工程教育现状，共议机械工程教育人才培养，擘画未来工程教育蓝图。

本次会议在中国科学技术协会和中国工程院的指导下，由中国机械工程学会、美国机械工程师学会、英国机械工程师学会、中国机械行业卓越工程师教育联盟、教育部高等学校机械类专业教学指导委员会、联合国教科文组织国际工程教育中心联合主办，上海交通大学承办，并得到上海振华重工（集团）有限公司、中国银行上海市分行、上海电气自动化集团等 20 余家国内企业和来自法国、日本、马来西亚、韩国、新加坡、丹麦等国际相关组织的广泛支持和参与。

会场盛况

## 一、汇聚全球翘楚，成就世界机械工程教育的盛会

上海市人民政府副市长吴清、中国工程院副院长钟志华院士、中国科协培训和人才服务中心主任辛兵、中国机械工程学会理事长李培根院士、美国机械工程师学会秘书长 Thomas Costabile、上海交通大学校长林忠钦院士先后致辞。教育部高教司司长吴岩作大会特邀专题报告。林忠钦校长、莫斯科航空学院校长 Mikhail Pogosyan 院士等 13 位中外重量级学者和专家分别围绕论坛主题作主旨报告。中国机械工程学会监事长、中国机械行业卓越工程师教育联盟理事长宋天虎、中国机械工程学会副理事长陈钢、常务副理事长张彦敏，副理事长兼秘书长陆大明出席会议。

面向未来是本次会议的显著特点。中国机械工程学会理事长李培根院士认为，“面向未来是人类的一个基本特性，也是社会发展的需要。基于这一需要，人类要有目的地展望未来。而教育，才能让人类实现这种展望。”他指出，“随着世界多元化、经济全球化深入发展和文化多样化、社会信息化持续推进，国际社会日益成为你中有我、我中有你的‘命运共同体’，越来越复杂的现代工程经常需要跨学科、跨领域、跨文化的解决方案，迫切要求未来工程教育要超越‘工程’本身。我们要着力推动工程知识、工程技术、工程人才的交流，推动社会各界之间、不同地区之间的合作交流。”

吴岩司长以《勇立潮头，赋能未来——以新工科建设领跑高等教育变革》为题，从精准把握高等教育发展大势、全面推进“四新”建设、新工科引领高等教育变革三个方面进行了介绍和分享。吴岩指出，当前中国高等教育正处在变化中，新工科应当在整个高等教育的变革中起到引领的

上海市副市长吴清致辞

中国工程院副院长钟志华院士致辞

中国科协培训和人才服务中心主任辛兵致辞

作用，做到理论先锋、标准先锋、方法先锋和实践先锋。当前中国工程教育，包括机械工程教育在内的新工程建设已经踏上了新征程、不断进行新探索，未来一定能够为打造新时代高等教育的“中国品牌”做出新的贡献。

27 日，教育部高等学校机械类专业教指委 2019 年专题会议、中国机械行业卓越工程师教育联盟 2019 年理事大会、ABET（美国工程与技

中国机械工程学会理事长李培根院士致辞

美国机械工程师学会秘书长 Thomas Costabile 致辞

上海交通大学校长林忠钦院士致辞并作主旨报告

教育部高教司司长吴岩作大会特邀专题报告

术评审委员会）年度会议以及“机械类工程教育专业认证”、“国际合作办学”、“智能制造卓越工程教育”、“机械制造课程教学研讨会”、“校企合作”、“新工科和学科交叉教育”六个分会场同时举行。分会场分别由中国机械工程学会、大连理工大学、上海交通大学、天津大学、同济大学、西安交通大学、清华大学天津高端装备研究院洛阳先进制造产业研发基地和东北大学等单位承办。各分会场紧扣大会主题，近 50 位国内外的机械工程教育专家和行业、企业界人士围绕教学改革、国际联合办学、工程教育认证、产学研合作等内容作精彩报告，针对卓越工程教育新观点、新方向进行开放式交流。

此次机械工程教育大会以多元的姿态，为国内外教育界、产业界和科技界搭建沟通交流的平台，全球顶尖专家共聚一堂，分享世界机械工程教育的改革和发展成果，并以全球化视角探讨新科技革命与产业变革对机械工程教育的影响，共同应对全球挑战，研讨工程教育新理念和新模式。正如中国工程院副院长钟志华院士指出的，“这不仅是中国机械工程教育界、也是世界机械工程教育界的一件大事，为国际机械工程教育的发展起到了良好的推动作用。”

## 二、融通中外智慧，探讨卓越工程人才培养

当今世界，以大数据、物联网、人工智能、纳米技术、虚拟现实、生物科技、社交媒体、区块链、太空探索等一系列最有潜力的新技术组成的信息革命浪潮正扑面而来，如何培养面向未来的卓越工程人才，成为国际工程教育界思考的重要命题。2019 国际机械工程教育大会上，全球工程教育界和产业界的重量级代表深入交流，探

讨新的工程教育理念，谋划工程教育的未来。

目前我国高等教育改革发展已经步入深水区，部分领域开始进入“无人区”，没有现成经验可以模仿复制。上海交通大学校长、中国工程院院士林忠钦认为，“中国工程教育正面临一系列亟待突破与解决的瓶颈问题，这些问题有的是中国独有的，但更多的是全球工程教育面临的共性问题，如何使工程教育得到更好地发展，在未来为全人类做出更大的贡献，是全球工程教育的同仁们需要共同思考与奋斗的主题。”他以上海交通大学工程教育为例，作了“构建卓越工程教育体系的思考与实践”的报告，介绍了上海交大卓越工程工科培养的核心理念与关键举措，强调“卓越工程教育的目标在于为学生在工程领域做出卓著贡献打下坚实基础，关键在于培养影响终生的职业胜任力与行业使命感。”

俄罗斯莫斯科航空学院校长、俄罗斯科学院院士 Mikhail Pogosyan 对技术与产业变革需求下，国家与高校机械工程教育人才培养进行了思考，认为面对科技与产业的变革需求，工程教育应顺势而动，改革教育项目以适应产业的最新需求。英国皇家工程院院士、英国曼彻斯特大学工程学院教授李琳介绍了面对智能制造这一重大挑战，英国机械工程教育的现状及发展战略，指出英国大学重视学生实践能力和职业素养的培养，“理论－实践－理论”“三明治”教育模式的普遍应用是英国高等教育的突出特点。美国罗格斯大学的 Alberto Cuitino 教授以“为数字经济培养创客一代”为题，从人力、新项目／新课程与合适的基础设施的角度，思考为培养创客一代而推进机械工程教育中遇到的关键挑战及积累的经验。

此外，德国卡尔斯鲁厄理工学院 Jivka

俄罗斯莫斯科航空学院校长、俄罗斯科学院院士 Mikhail Pogosyan 作报告

英国皇家工程院院士、英国曼彻斯特大学工程学院教授李琳作报告

美国罗格斯大学的 Alberto Cuitino 教授作报告

Ovtcharova 院士、天津大学顾佩华院士、法国国立高等工程技术学院副校长 Ivan Iordanoff 教授、英国哈德斯菲尔德大学 John Allport 教授等还就“人工智能”、“新工业革命与新工科教育”等议题作了主旨报告……专家学者高屋建

德国卡尔斯鲁厄理工学院 Jivka Ovtcharova 院士作报告

法国国立高等工程技术学院副校长 Ivan Iordanoff 教授作报告

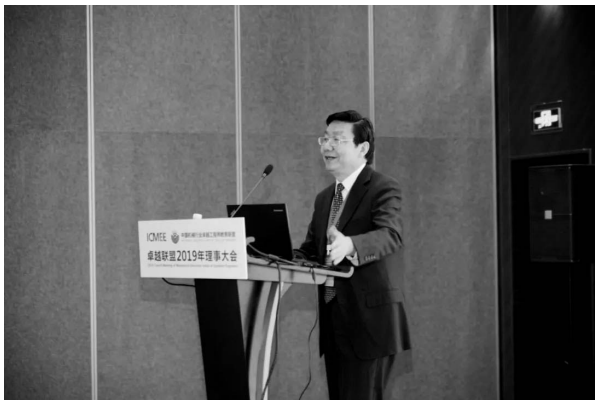
天津大学顾佩华院士作报告

英国哈德斯菲尔德大学 John Allport 教授作报告

瓴、视野开阔，聚焦工程教育领域热点和难点，研讨工程教育新理念和新模式，为面向未来的卓越工程教育改革提供了破解思路。

在一年一度的卓越工程师教育联盟理事大会上，中国机械工程学会监事长、卓盟理事长宋天虎指出，“联盟将继续秉承面向工业界、面向世界、面向未来，致力于在最‘接近真实世界’的环境下培养卓越的工程人才的宗旨，以引领未来，拥有未来”。教育部机械类专业教学指导委员会主任、东北大学校长赵继教授、大连理工大学机械工程学院院长王永青教授、华中科技大学机械科学与工程学院院长丁汉院士、中国机械工程学会工程教育认证委员会主任、大连理工大学李志义教授、华为 EBG 人才生态发展部卢鹏副部长以及法雷奥集团首席技术官顾剑民 6 位报告人分别从机械工程教育创新发展、中外联合培养一流精英人才的探索与实践、研究型大学机械专业拔尖创新教育体系构建、产学合作培养卓越工程人才、新工科建设的理念与举措等主题做了分享。

中国机械工程学会监事长、卓盟理事长宋天虎



中国机械工程学会工程教育认证委员会主任、大连理工大学李志义教授

教育部机械类专业教学指导委员会主任、东北大学校长赵继教授

## 三、推动深层次合作，擘画工程教育未来蓝图

在全球化背景下，以新技术、新业态、新产业为特点的新经济迫切需要培养具有跨界整合能力的新型创新人才。作为大会的主办方，中国机械工程学会近年来联合众多国际知名的工程组织成功举办多次机械工程教育国际会议，以深化中外机械工程教育领域的交流合作，推动工程教育的改革、创新和发展。2016 年，中国成为《华盛顿协议》正式成员，标志着中国高等教育对外开放向前迈出了一大步，中国高等教育走上国际舞台。在此形势下，开展工程教育专业认证对创新工程人才培养具有重要意义。

在机械类工程教育专业认证分会场上，中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明以及大连理工大学教务处处长刘志军教授、天津大学胡绳荪教授、韩国弘益大学 Jung Soo Kim 教授、华中科技大学吴波教授、重庆科技学院机械学院副院长何高法教授、北京工业大学高国华教授、大连理工大学教务处副处长刘新教授等国内外认证专家分别就工程教育专业认证现状、工程教育专业认证中成果评价、课程教学与质量评价、专业特色建设、核心课程体系构建、培养方案的修订等主题与参会代表分享了有关案例，并就目前存在的主要问题展开对话。

中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明

ABET 年度会议上，美国 ABET 国际参与和管理处主任 Danielalacona 介绍了 ABET 认证体系，指出 ABET 是国际公认的最具权威的认证体系，也是华盛顿协议 6 个发起工程组织之一，通过 ABET 认证，意味着一所大学可以培养具有国际竞争力的工程师。正如中国科学技术协会相关领导指出的，“开展工程教育专业认证不仅是国际通行的工程教育质量保障性制度，也是工程教育国际互认和工程师资格国际互认的基础性机制。”作为科协系统的重要组成部分，中国机械工程学会将站在时代变革的前沿，继续在我国专业认证体系建设中发挥引领作用。

面向未来的卓越工程教育，需要探索学会、高校、企业联合培养卓越工程人才的有效机制和

机械类工程教育专业认证对话现场

方式，“需要世界各国教育从业者、产业界人士以及政府教育管理者共同努力，充分发挥各国工程学会的积极作用，实现各国机械工程教育多领域、深层次的交流合作。”上海交大校长林忠钦这样说到。在林忠钦院士、中国科协培训和人才服务中心辛兵主任、中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明和马来西亚工程师学会副理事长陈志辉见证下，中国机械工程学会理事长李培根院士与马来西亚工程师学会理事长 Kong Phooi Lai 签署合作谅解备忘录。上海交通大学在此方

中国机械工程学会理事长李培根院士与马来西亚工程师学会理事长 Kong Phooi Lai 签署合作谅解备忘录

面也积极探索，通过从底层到高阶的创新改革工作，保证了坚实的跨学科理论知识、较强的全球胜任力、卓越的团队合作与组织能力以及对现代机械系统的深刻洞悉和把握，对面向未来的卓越人才的培养提供了借鉴经验。

中国机械工程学会理事长李培根院士表示，“通过大家的共同努力，工程教育发展的目标一定会变得更加清晰，我们致力于培养面向未来的卓越工程人才的步伐一定会变得更加协调一致，我们将以本次会议为契机，为面向未来的机械行业持续健康发展做出更大贡献。”

## 四、深化平台培养探索办学特区，上海交大持续创新工程人才培养模式

作为本次大会的承办方，上海交大在工程人才方面大力推进与通识教育相融合的宽口径专业教育，积极开展大类培养平台、致远荣誉计划、“以我为主”的国际化合作办学等探索，培养适应经济社会发展需要的复合型人才。

从 2014 年起，上海交大开始实施工科平台试点，推进宽口径大类招生培养工作，大平台培养模式意在进一步夯实学生的数理化与多学科基础，强化实验实践课程，注重各专业之间的交叉与融合。2018 年交大打通工科平台、工科专业、致远工科荣誉计划三类培养体系，将工科平台培养优势推广到相关院系所有工科专业中，形成“大工科”培养体系，持续扩大学生受益面。

在学生的创新实践上，上海交大以学生创新中心为载体和平台，以新技术为牵引，实现产教深度融合，引入学生创新实践能力培养新资源，并先后与华为、英特尔、IBM、微软、腾讯、霍尼韦尔等企业签署合作协议，聘任了 120 多名企业导师，为学生创新教育提供了强有力的师资支持。交大还针对当前科技界和工业界关注的方向设立 21 项校级竞赛，包括无人机、新能源汽车大数据、工业 4.0APP、智能出行等。同时，学校围绕以上热门领域开设企业课程，与科创竞赛互为支撑，为学生开展团队协作、参加竞赛提供支持。

在不断深化大类平台培养的同时，交大还推进办学特区的建设，探索多种人才培养模式。拔尖人才培养特区致远学院形成的交大特色基础学科拔尖学生“致远培养模式”，获“Reimagine Education 2016”两项全球教育创新奖。机械与动力学科拔尖人才培养钱学森班旨在探索工程科学领域创新人才培养的新模式，为行业培养科学和工程素养兼备的全面型、创新型拔尖人才。2011 年上海交大机械与动力工程学院入选“国家教育体制改革试点学院”，今年入选教育部“三全育人”试点单位。国际化人才培养特区包括上海交大密西根学院与上海交大－巴黎高科卓越工程师学院。上海交大密西根学院 2014 年荣获“Andrew Heiskell 国际教育革新奖”。上海交大－巴黎高科卓越工程师学院 2016 年被中法两国政府评为“中法大学合作优秀项目”，2018 年荣获上海市教学成果奖一等奖。

（文章来源，本刊编辑，2019 年 10 月）

# 美国机械工程师学会代表团来访我会

2019 年 8 月 22 日，中国机械工程学会副理事长兼秘书长陆大明在中国机械工程学会工作总部会见美国机械工程师学会（ASME）秘书长兼首席执行官 Thomas Costabile 一行。

学会代表向 ASME 代表团介绍了中国机械工程学会的基本情况，以及将于 2019 年 10 月与 ASME 合作在上海举行的机械工程教育大会筹备情况，双方围绕教育大会的相关细节进行了讨论。

此外，双方秘书长就共同关心的问题交换了意见，并就未来加强学术交流合作达成共识。

美方同行人员包括：ASME 行业技术开发部总监 Deborah Holton、技术与业务开发部主任 Raj Manchanda、ASME 北京代表处首席代表张强等。中国机械工程学会副秘书长左晓卫，以及教育培训处、国际联络处有关负责人参加会见。

（文章来源：工作总部，2019 年 8 月）

# 我会组织专家参加亚太工程组织联合会（FEIAP）第 27 届全体大会暨第 5 届国际学术研讨会

2019 年 6 月 29-30 日，亚太工程组织联合会（FEIAP）第 27 届全体大会暨第 5 届国际学术研讨会在古都西安举行。大会围绕促进亚太地区各国“工程教育资质互认”等议题展开讨论，探讨新形势下国际工程教育应承担的责任与使命，以及通过促进区域间工程教育资质互认，有效地推动亚太各国乃至全球经济社会发展。

华盛顿协议主席伊丽莎白·泰勒，欧洲工程教育协会副主席路易斯·桑切斯·瑞斯以及来自美国、日本、印度、新加坡、马来西亚、缅甸、菲律宾、柬埔寨等 21 个国家和地区的 300 余名代表出席大会。会议由亚太工程组织联合会主办，中国科协与西北工业大学联合承办。我会罗平秘书长助理及相关专家参加了此次大会；中国机械行业卓越工程师教育联盟秘书长何存富受邀参会并做了题为“学会在‘一带一路’区域工程教育中的角色与责任”的主旨报告。

西北工业大学常务副校长、亚太工程组织联

合会候任主席、中国科学院院士黄维代表大会承办方西北工业大学致欢迎辞，热烈欢迎各位嘉宾的到来。亚太工程组织联合会主席李建中、陕西省人民政府副秘书长姚建红、教育部高等教育司二级巡视员吴爱华出席开幕式并致辞。全国政协常委、中国科协原党组副书记、书记处书记、副主席张勤代表活动承办方中国科协致辞，预祝大会圆满成功。开幕式由西北工业大学党委副书记万小朋主持。

黄维介绍了西北工业大学在工程领域人才培养和科技创新方面取得的成就，表示“西北工业大学与联合会有着良好的合作基础与共同的发展志向，未来学校将更加积极推进工程教育及其应用的发展，与全球伙伴密切合作，为共同促进亚太地区和‘一带一路’沿线国家工程教育及工程发展做出更大贡献，进而推动世界科技进步并为构建人类命运共同体提供力量。”

李建中在致辞中表示，27 年间，联合会成员数量一直稳步增长，现已拥有 25 个成员单位和 2 个预备成员单位。在人类社会发生巨大变化的今天，联合会将推动工程领域突破传统课堂教育限制，与国际社会建立更加紧密的合作关系，发展符合社会需求、知识面广阔、更加国际化的工程教育体系。

姚建红介绍了陕西历史、科学教育基本情况，表示工程及教育界在陕西工业、经济、社会发展中起着至关重要的作用，让陕西成为了中国西北地区工业及科教大省。希望在亚太工程组织联合会的指导下，陕西工程教育和工业发展能够为中国乃至世界经济社会发展产生更为重要的促进作用。

吴爱华介绍了中国高等工程教育所取得的丰硕成果，并结合高等工程教育改革创新相关情况，提出“要通过推动理念、专业、模式、组织变革，积极面对第四次工业革命挑战，共同构建面向未来的工程教育，促进中国及世界创新经济发展，

为构建人类命运共同体做出更大贡献。”

张勤代表中国科协，对大会盛大召开表示诚挚祝贺。他表示，亚太工程组织联合会是亚太地区经济发展的重要驱动引擎，组织成立以来，对亚太地区乃至世界经济的发展做出了突出贡献。希望联合会继续为各成员国工程领域发展及工程教育提供督导帮助，搭建国际交流合作创新平台，为亚太地区乃至全球技术进步、经济发展提供源源不断的智力支持。

现场还举行了黄维院士当选东盟工程与技术科学院外籍院士的受聘仪式。

马来西亚拉曼大学校长蔡贤德代表东盟工程与技术科学院为黄维院士颁发聘书。蔡贤德表示，“来自中国大陆的黄维院士即将成为亚太工程组织联合会的主席，表明中国将继续在引导和推动亚太乃至世界工程教育方面发挥重要作用。相信借助联合会的平台，全球工程师们将在工程领域获得更多的实用性技能，激发更大潜能。”

在李建中、伊丽莎白·泰勒、姚建红、张勤、路易斯·桑切斯·瑞斯、陕西省教育厅厅长王建利、吴爱华、亚太工程组织联合会秘书长陈彦振、教育部高等教育教学评估中心副主任周爱军，工业和信息化部国际组织处处长张晓雷的共同见证下，西北工业大学副校长张卫红代表学校分别与马来西亚工程师协会、新加坡工程师协会签署合作备忘录，推动高等工程教育国际合作与发展，助力我国工程人才走向世界；与亚太工程组织联合会签署“西北工业大学—亚太工程组织联合会‘一带一路’工程教育培训中心”，培训中心的成立将促进“一带一路”沿线国家加快高等工程教育与国际接轨的进程，进而带动辐射高校专业建设的整体提升，满足区域经济社会发展对国际化高端工程人才的需求。

华盛顿协议主席伊丽莎白·泰勒女士作为特邀嘉宾，也在现场接受了记者的采访，她认为“中国是世界重要的经济体之一，在国际舞台上发挥着越来越重要的地位。希望通过本次大会，加强华盛顿协议成员与中国在工程教育方面的合作，进一步推动工程教育在世界的推广和发展。”

工程教育认证是高等教育质量保证体系的主要组成部分，也是一个国家教育国际化的重要标志，开展工程教育认证对提高中国工程教育质量，借助工程技术人才优势在国际竞争中占据领先地

位具有重要意义。承办本次大会，将促进西北工业大学根据国际工程教育通行理念进行工程类相关专业教育教学改革，培养出具有国际竞争力的工程技术类人才，进而有力地推动西北工业大学“双一流”建设。

开幕式后举行的国际学术研讨会上，吴爱华、蔡贤德、伊丽莎白·泰勒、中国钢结构协会常务理事陈以一、路易斯·桑切斯·瑞斯、亚太工程教育联盟执委王雪、中国机械行业卓越工程师教育联盟秘书长何存富、西北工业大学校长助理杨

益新、马来西亚工程师协会副主席谭之辉（Tan Chee fai）、亚太空间合作组织教育和培训部部长穆罕默德·埃布西米（Mohammad Ebrahimi Seyedabadi）、联合国环境规划署－同济大学环境与可持续发展学院常务副院长李风亭、西北工业大学研究生院常务副院长殷小玮、河海大学水文水资源学院党委书记陈元芳、柬埔寨工程师委员会副秘书长Khvay Sopheap，围绕如何发展“一带一路”沿线国家工程教育、推动工程师及学生国际合作与交流、促进不同国家区域间工程教育资质互认等相关主题作主旨报告。

论坛期间同期举行亚太工程组织联合会自然灾害委员会、信息与通信技术委员会、环境工程委员会研讨会。

亚太工程组织联合会是亚太地区重要的工程组织之一，该组织于1978年在联合国教科文组织、世界工程组织联合会等国际组织的支持下成立，是中国科协加入的7个非政府国际组织之一。联合会在基础建设、工程教育等众多领域具有广泛影响力，其宗旨是鼓励通过技术进步推动世界经济和社会的发展，通过工程学科的职业化，为全人类谋求福祉，促进世界繁荣和平。

据悉，2017年11月，黄维院士应邀赴泰国参加了东盟地区工程组织联合会第35届大会与亚太工程组织联合会第9届理事会，经中国科协推荐，作为中国代表，正式当选为联合会副主席和候任主席。

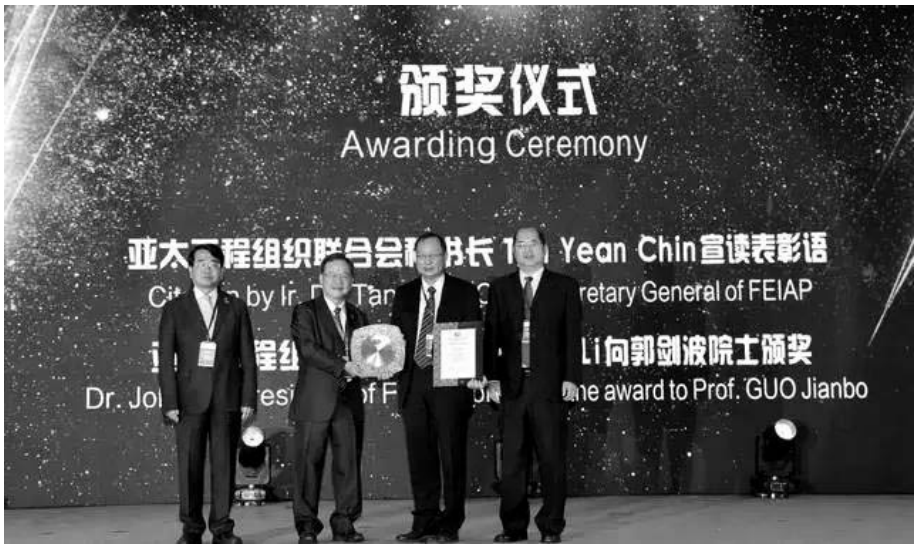
本次亚太工程组织联合会全体会议在中国召开具有里程碑意义，在30日的亚太工程组织全体大会上，黄维院士将正式履新联合会主席一职，这是国际重要学术型组织首次在中国大陆地区举行主席履职仪式，表明中国工程领域发展已初步融入国际工程领域发展进程，工程教育水平已获国际认可。

在活动现场，黄维院士接受了记者采访。他表示未来将着力构建、制定亚太及“一带一路”区域工程教育培训标准，推广中国工程技术人员在沿线国家的资质互认，深化中国科技工作者对全球科技治理体系改革的参与，从而提升中国在重要国际组织的影响力，为全球治理体系改革贡献中国智慧和中国方案。

29日当晚，西北工业大学党委书记张炜会见了参加本次大会的部分嘉宾。

在亚太工程合作组织联合会年度颁奖晚宴上，还举行了年度工程师颁奖仪式。

（文章来源：西北工业大学，2019年7月；本文有删改）



# 高等学校机械类专业实验实训设备与安全管理研讨会在京举办

2019 年 6 月 22 日 -23 日，由中国机械工程学会主办，北京科技大学承办的高等学校机械类专业实验实训设备与安全管理研讨会在京举行。北京科技大学副校长薛庆国出席活动并致辞，会议由中国机械工程学会教育与培训处处长王玲主持。

本次研讨会的主要目的是为使高校机械类专业能够按照工程教育专业认证标准做好实验实训环节建设，为培养学生工程能力、社会责任、环境与安全意识等方面的核心素质创造良好条件。共有来自 20 多所高校的机械类专业教学院长、专业负责人、骨干教师等 70 余人参加了研讨。

本次研讨会共分成主题报告、互动研讨两个部分。第一部分邀请大连理工大学教授李志义、天津大学教授胡绳荪、北京天海工业有限公司教授级高级工程师陈清利、重庆科技学院院长何高法分别就“专业认证若干问题的深度探讨”、“基于认证标准关注重点问题”、“完善机械类实验实训教学基地安全环境建设做好专业工程教育认证工作”以及“机械类专业认证自评报告撰写”作主题报告。第二部分通过现场互动，进行了关于完善实验实训教学基地建设，做好工程教育专业认证的工作研讨。

本次研讨会通过近年来按照国际实质等效的工程教育专业认证标准对照检查，力争缩小高校实验实训设备和安全管理与规范化之间的差距。本次研讨会通过精心组织和策划，内容丰富、环节紧凑，得到了参会人员的充分肯定和较高评价，也为提升高校实验实训环节建设、促进培养学生工程能力与职业素质工作的深入开展创造了有利条件。

（文章来源：教育与培训处，2019 年 7 月）

# 2019 年工业工程暑期系列活动纪实

2019 年 7 月 24-26 日，一年一度的工业工程暑期系列活动——“第十六届工业工程应用与推广及人才培养研讨会暨第十九届高等学校工业工程专业暑期教师培训班”，在山西太原交通大厦二楼报告厅隆重召开。

本次暑期活动由中国机械工程学会工业工程分会主办，山西省机械工程学会、北京机械工程师进修学院协办；天津大学、太原科技大学、中北大学承办。参加本次活动的有中国机械工程学会工业工程分会常务副理事长、天津大学齐二石教授，中国机械工程学会工业工程分会副理事长、西安交通大学苏秦教授，中北大学校长沈兴全教授，山西省机械工程学会秘书长李玉贵教授，太原科技大学经济管理学院院长乔斌教授，教育部工业工程类教学指导委员会副主任委员、南京航空航天大学周德群教授，浙江工业大学鲁建厦教授，郑州大学王金凤教授，教育部工业工程类教学指导委员会委员、吉林大学孔繁森教授，山东工商学院张顺堂教授，以及全国 70 余所高校教师及企业高级管理人员共 180 余人。

工业工程分会副理事长汪玉春先生主持开幕式。齐二石教授在开幕式上致辞，并希望参会代表，要不断探索创新，推进工业工程发展。中北大学校长沈兴全教授全面介绍了高校学科建设并希望借会议契机推进山西省高校工业工程专业建设。李玉贵秘书长介绍了山西省科技发展状况并希望通过大会能够促进山西省管理创新与企业发展。

**系列活动一：**第十六届工业工程应用与推广及人才培养研讨会

研讨会上，齐二石教授、汪玉春副理事长、吉利汽车晋中公司张春峰以及日本能率协会资深专家关田铁洪教授、孔繁森教授、北京津发科技有限公司董事长赵起超、北京知为先咨询公司总经理郑克杰分别作了报告。报告内容丰富、务实，学术与实践并重，受到了各界参会代表的一致好评。

**系列活动二：**高等学校工业工程专业 2019 年暑期教师培训班

教师培训是加强教师队伍建设的重要环节，是推进素质教育，提高教育质量的重要保证。为此，中国机械工程学会及其工业工程分会于 7 月 26 日举办了“高等学校工业工程专业 2019 年暑期教师培训班”。来自全国各地高校的 70 余名教师参加了培训。

培训班特邀鲁建厦教授作为嘉宾主持，苏秦教授作了制造质量强国之路报告，重庆大学陈友玲教授作了面向创新能力培养的生产计划与控制课程建设与实践的报告。

本次教师培训内容充实、主题明确，紧密结合教育教学与工业工程的应用，为参加培训的高校教师提供了工业工程专业持续改进的新思路，

（下转第 34 页）

# 李培根：《工程教育的“存在”之道》

**作者：**李培根，中国工程院院士，华中科技大学工程教育研究中心教授。

**摘要：**本文指出，工程教育改革的重要任务之一是改变工科专业教育中仅仅着眼于技术的现象，需要把工程技术之“道”真正融入到专业教学活动中。从“存在”（并非真正哲学意义上）的视角审视工程技术，既是工程技术之道，也是工程教育之道。文中提出分别从存在的显处、存在的隐处、以及“紧闭的存在深处”洞察和探究工程技术，有利于学生创新能力的培养。讨论的出发点基于让工科专业教师容易接受且有可能实践。

**关键词：**工程教育 教育改革 存在 存在主义 存在感 创新

## 引言：工程教育也应存在于“道”

工科教育中，尤其是工科专业教育中，教师们普遍关心的是技术本身。至于工程与技术的哲理、工程技术之道，似乎不是专业教师的任务。也许某些学校安排了类似“技术哲学”的课供学生选修，笔者与华中科技大学的几位教授共同讲授的“工程导论”中就有一些涉及工程技术哲理的内容。但仅仅靠一门课是不够的，真正重要的是工科专业教师的工作不能停留于“器”，而应该“道”“器”不离。

中国的传统文化是重视“道”的。《易经·系辞》有言：“形而上者谓之道，形而下者谓之器。”子曰：“君子不器”。孔子还讲：“小辩破言，小利破义，小艺破道，小见不达，达必简。”（《淮南子．泰族训》）很多人常常提到樊迟请学稼、学圃的故事，孔子曰：“小人哉，樊须也！上好礼，则民莫敢不敬；上好义，则民莫敢不服；上好信，则民莫敢不用情。夫如是，则四方之民襁负其子而至矣，焉用稼？”有人说，孔子岂不是视樊迟为“小人”？这是否说明儒家文化中对从事技艺者似有不屑？也有学者认为，那是后人曲解了孔子的原意。孔子言“君子不器”，并非瞧不起为技为艺者，而是讲君子不能拘泥于形式，不应该只注重“器”的表面的东西。原意若真如此，当然很有道理。但不管怎么说，中国传统中存在重道轻器之说恐怕是成立的。曾几何时，西方的火炮、船模、望远镜等先进技术被某些人视为奇技淫巧。哪怕到现代，很多知识分子，包括技术工作者自身都没把工程技术看成“形而上”的东西。绝大多数工科教师在教学活动中往往也是就器论器，就技论技。这不正如孔子所言的“小艺破道”吗？工科教师何以如此看低自身工作的意义呢？

西方有不少学者从更高的层面看工程和技

术。如德国哲学家胡塞尔在《欧洲科学的危机与超验现象学》中批评“只见事实的科学造成了只见事实的人，……实证科学正是在原则上排斥了一个在我们的不幸的时代中，人面对命运攸关的根本变革所必须作出回答的问题：探问整个人生有无意义。”他批评“纯粹的事实科学造就纯粹事实的人”。人被事实化了，成了“事实”和“物”，成了实证科学加以实证的对象。[1] 这些话在今天仍有积极意义。著名存在主义哲学家海德格尔将现代技术的全球运动看成是“一种力量，它对历史所起的决定性作用怎样强调都不过分。[2]”

我国也有一些学者对工程和技术的认识有很高的见地。如吴国盛言，“一言以蔽之，技术是人类存在的方式，技术是人类自我塑造的方式，技术是世界的建构方式，技术是世界和人的边界划定方式。[3]”陆有铨说“存在主义认为，教育不仅要关心如何使人存在于自然界，更要注意使人存在于工业社会。在目前的工业社会中，人只不过是自动化生产线中的一个部件，个体的真实存在被破坏了。现在应该用强调真实的、人道的个人存在来抵消工业社会中的机械化和非人格化的现象。”[4] 这些都是真知灼见。遗憾的是，绝少有从事工程教育的学者从类似的高度看问题，更不用说在工程教育中实践之。

不得不承认，我们的工程教育基本上停留在“器”的层面。工程技术的对象的确是“器”，但工程教育若只是面对“器”，则教师和工程教育的对象（工科学生）都会变成“器”。欲“君子不器”，就应该使工程教育也要存在于“道”中，即“道”“器”不离。工科教师当明白，要提升专业教育的质量，不能只是教学生“小艺”（只是传授技术细节），还要让学生领会“道”。需要特别说明的是，让专业教师和学生领会工程技术之“道”，不是故作高雅，实实在在乃创新能力培养之需。

虽然主张工程教育当“道”“器”不离，但本文中的“道”和下文中讨论的“存在”，并非真正哲学意义上的。真正哲学意义上的讨论恐怕很难引起多数工科教师的共鸣，也非笔者所能为，或许适合于在“工程哲学”的象牙塔里。本文意在使工科专业教师从普通的“存在”视角去领会工程技术之道和工程教育之道，出发点基于让工科专业教师容易接受且有可能实践。

## 一、存在的显处

此节之所以言“存在的显处”，乃因为讨论的“存在”并非哲理意义上的，而是用户或消费者容易感知体会到的，是企业家、工程技术人员应该重视的，当然也是工科教师和学生应该体悟和知晓的。

**1. 存在环境。**

前些年，大众汽车在德国德累斯顿建了一个“透明工厂”，这个厂的特别之处是其设计理念。生产线地面全部铺设松木地板，良好的缓震效果可以减小工人的脊柱损伤。工厂位于德累斯顿城中心的易北河畔，和城市植物园相距仅数百米，与市容和植物园和谐地融为一体。德累斯顿是德国一座具有悠久历史的文化名城。为了使工厂更好地融入这座城市的文化，工厂前的草坪上，可以举办古典音乐会，专业的乐团可以在那里演奏。可以想象工人在工厂的草坪上欣赏古典音乐是何种体验吗？更有甚者，还有令人惊叹的设计，大楼四周，使用扩音器播放多种鸟类鸣叫的声音，使鸟儿远离玻璃幕墙。更令人叫绝的是工厂夜间黄色系的灯光，意在避免侵扰昆虫。尽管昆虫完全不能体验到人类的现代文明，它们仅以不失去

既有的存在而满足。

不得不说这是现代工业文明的进步。德累斯顿汽车厂的设计者不仅考虑了人的存在，而且关注了鸟类、昆虫的存在。设计者身上展现出的新设计文明，不仅表现在他们对美的存在的想象，更体现在他们心目中对美的感受者（人）之存在的关注。存在也能显现出大美。如果由此而联想到工程教育，是不是需要培养工科学生的美感？而美感是否又关系到对存在的关注和想象？

关于人类的存在环境，涉及能源、气候、生态等问题，诸如绿色设计、绿色制造等理所当然是工程专业应该触及的重要问题，本文中不再讨论。

**2. 人的存在感。**

尽管存在是一个具有哲学含义的词，但在工程技术中，它又和人的普通感受联系在一起。人的存在感体现在工程与技术的很多场景中，但却往往被很多工程与技术工作者所忽略。虽然很多工程师在其设计中可能下意识地满足人的存在感，但若能在大学阶段有意识地使学生在工程或技术设计中重视存在感的表现，则更有利于创新，有利于他们成为卓越的工程师。

“以客户为中心”是现代企业的重要理念。满足客户的存在感，是“以客户为中心”理念的重要体现。

工业活动中考虑人的存在感首先应该表现在某些产品中。不难想象，能够很好地满足人的存在感的产品一定是受客户欢迎的。微信、WhatsApp 之类的产品之所以广受大众欢迎，乃因为它们很好地满足了人们的存在感。在群里、在朋友圈中，一个人很容易表现他的存在。介绍某事物或自己的活动，就某事发表议论、点赞等，都是表达自己存在的方式。微信中的红包是华人喜欢表达自己存在的一种方式，自然也特别受华人欢迎。卡拉 OK 之所以受到不少人欢迎，大概也是让人容易展示或宣泄自己的存在。我们可以看到市场中有些面向儿童学习或娱乐的机器人产品，对儿童没有粘性，即儿童只有非常短暂的兴趣。原因何在？因为机器人即使知识丰富、很聪明，但如果孩子在与其互动的过程中找不到存在感，则兴趣索然。对很多消费类产品（如时装、玩具等）而言，满足人的存在感应该是设计师高度重视的要素。即使是非消费类产品的某些装置或设备，也有满足存在感的方式。如，记录对其操作娴熟程度的过程，也让使用者对自己操作进展速度或者水平获得满足。即便一时得不到满足，从中获得激励，最终还是可能获得存在感。又如，提供非常方便友好的开发界面让用户设计出适合于企业甚至操作者自身的应用软件，都会使客户有良好的存在感，从而更受欢迎。

存在感也应该体现在产品开发过程中。有可能在产品的开发过程中体现客户的存在感吗？现代网络技术、人工智能技术恰恰提供了这种可能性。维尚集团生产的家具多采用个性化定制，他们现在的家具产品很少是完全一样的，因为在设计过程中客户可以通过网络参与意见。客户的房屋构造、家居环境不一，客户喜好各异，自然使得维尚的家具千姿百态。需要指出，维尚不仅要满足用户个性化需求，还必须实现规模化生产，否则难以赢利。这就对企业的产品开发、生产控制、物流、管理等诸多环节提出挑战。解决办法无非是借助数字化、网络化、智能化技术（本文不讨论具体技术问题）。海尔开发新产品的理念也与过去大相径庭，过去是先有产品后有用户，现在是先有用户再有产品。在新产品开发过程中，他们通过一个云平台充分吸收用户的想法、建议，

把成千上万用户的碎片化需求、想法进行整理归纳，变成有用而新颖的设计。不难想象，没有相应的数据处理和一定程度的智能技术，不可能实现这种产品开发模式。维尚和海尔的模式中，客户在产品的开发过程中参与意见，使其感觉到产品也体现了自己的想象力，也包含了自己的价值，无疑增强了他们的存在感。强烈的存在感一定可以使客户更加钟情于制造商的品牌和产品。

客户的存在感还可以表现在生产过程中。如，客户定制某种产品或部件，传统方式是生产厂家按期、按质量交货即可。生产厂家有无可能在制造过程中让客户有某种知情权？如，客户希望知道制造的进度，希望了解加工过程中的质量情况？当然，如果让客户到制造商的车间中去查看，那就太麻烦了。用户只需在计算机甚至手机上浏览那个与现实车间完全同步的“虚拟车间”就可以获得。

开源也是一种新的技术文明，它使设计者获得存在感。早期一批黑客对开源文化的普及发挥了重要作用，他们对智慧成果共享以及自由的追求使开源表现出强大的生命力。从深层次看，共享和自由文化的背后其实也与存在感有关。

## 二、存在的隐处

这里所指存在的隐处，意为已经存在的、但难以为人所感知的。

处于隐处的存在在中国的传统文化中很容易找到。中国传统文化注重整体联系，如古代的“五行”，相生相克，虽然欠缺科学，其大系统观和整体联系的思想却有合理成分（当然也不能说因其思想有合理成分而说明“五行”是存在的）。中医和针灸学说中所言的某些（非全部）联系恐怕是不争的事实，如足部或腿部某穴位与腰痛存在联系。现代解剖学手段亦很难发现其直接联系的证据，但实践（如针灸）不由得我们不相信“存在”某种隐性的联系。客观世界中有很多隐性关联的存在。如超市中尿布与啤酒的销售存在某种关联，即便是超市管理专家原先也不可能意识到，只有通过特别的手段（如数据分析）发现之。工程中有大量类似的例子。要启发学生关注和想象隐性存在的关联，让学生明白数据和智能技术可以帮助人们认识隐藏的“存在”。这种意识很容易导致创新。

数据中不仅潜藏着人们不易察觉和意识到的关联，虚拟世界或数字世界中还隐藏着人们更难意识到的存在。有学者甚至认为存在“数字生命”[5]。美国加州大学计算机系的教授克吉斯·阿加米设计制作了一套名叫“阿威塔”的软件程序，专门展示“数字生物”的演化生命过程。“阿威塔”提供观察几百万代“数字生物”随机突变和自然选择的可能。“这些小东西进化速度惊人，具备的本领越来越多。最让人兴奋不已的是，它们所走的路线与进化论的路线不谋而合，几乎完全重叠了。它们复制、突变、竞争，自然选择的过程一样也不少。总之，与自然界生物进化规则几乎毫无二致，只是速度奇快，有时简直让人应接不暇。”虽然对于“数字生物”的观察研究依然处于起步阶段，哪怕研究者自己也难以解释其中奥秘，但工科的学生对此类话题多一点好奇和想象无疑是有益的。

## 三、紧闭的存在深处

弗里德里希·德绍尔说，“技术的本质呈现为某种特殊的东西，它使我们瞥见紧闭的存在深处。”“创造物的一种新形式，从未包含在创造物中的东西，一个具有单一本性、单一本质的客

体，从来没有过的，现在化为存在了。”[6] 人的存在不仅异于物的存在，而且与其它动物的存在明显不同。敖德嘉·加塞特言，“人的存在由奇特原料构成：部分与自然同类，部分不同；同时是‘自然的’和‘超自然的’，一种存在论上的‘半人半马’（centaur），一半沉浸其（自然）中，一半超乎其外。”[7] 动物的存在是“自然的”，人的存在却有“超自然的”部分。今天我们生活中用到的绝大多数东西，曾经都是世界上不存在的，正是技术让他们存在了，是技术让它们伴随着人类的生存。或者说，是技术让它们从“紧闭的存在深处”走到存在的显处。回顾人类的文明史，人总是在他们所依赖的客观世界之上建立“超世界”的存在。如何实现这一点，得靠技术，这恰恰是工程师的问题——正是“人的生存”的主题[7]。

认识“紧闭的存在深处”，对于工科学生尤为重要。几乎所有含工科专业的高等学校都强调学生创新能力的培养，而且还在学生中开展一些创新活动。但是，不难发现，很多大学生、研究生的“创新”对象往往针对已有的“存在”，或者说已经是在“存在的显处”了。即使市场中还不存在与其构想完全相同的产品，但市场已经“存在”对更强功能的需求了。虽然他们的技术中也可能含有创新的成分（与既有的产品不完全一样，且功能也有所提高），但这种创新多半是“增量创新”，而非原始创新。真正“紧闭的存在深处”是市场上人们根本未意识到的需求，如此而导致的创新肯定是原始创新，甚至为颠覆性创新。工程技术方面的创新最终一定要和需求联系在一起，最终不能产生需求的发明不能称之为创新。我国的绝大多数工程师、工程学科的学者以及学生往往关注市场的现实需求，他们所从事的创新工作多是如何适应和满足市场需求。殊不知，需求其实有两侧，一是“适应侧”，即如何满足、适应市场现实需求；另一侧则是“供给侧”或“创造侧”，即供给或创造目前市场上还没有的需求。如乔布斯在构思智能手机时，当时市场上尚不存在这种需求。乔布斯当然是在供给和创造需求。一般而言，供给和创造需求而致的创新多半是伟大的创新，创新者面对和洞察的恰恰是“紧闭的存在深处”。

对超能的向往一直伴随着人类的进步，古代神话或以前科幻作品中的某些能力似乎逐步在以某种形式变成现实。现代技术进步已经使我们可以感受到某些人造物的特别能力，如超级智慧能存在于机器或人工智能系统中。AlphaGo 的棋力已经明显超越了人类顶尖围棋手的棋力。对于职业围棋手而言，可怕的不是 AlphaGo 关于围棋的人类思维，而是它们的“非人类思维”。也就是说 AlphaGo 在自己的实践中对围棋有了它自己独特的理解，有了异于人类的围棋思维，这才是让人类棋手可怕之处。今天，已经有很多人造物远超人类某方面的能力的例子，如对声音、色谱、图像等的辨别能力。今后的技术到底会发展到何种程度，今天还难以想象。如量子技术的发展，或许某一天会颠覆人类的宇宙观。总之，对于工科学生而言，尽可能地想象人造物（机器、软件……）的超能，想象处于“紧闭的存在深处”的超能，实际上是创新能力的养成。

因此，如何引导学生想象、探究“紧闭的存在深处”是工科教育中至关重要的一环。我国原始创新特别少，和我们的教育多少有些关系。或许有人质疑，指望大学生都能有原创的成果，未免太想入非非了。的确，无论学校和教师怎么努力，能够产生原创成果的大学生一定是少之又少。

但是，如果致力于培养学生对“紧闭的存在深处”的想象和探究，是不是在大学期间一定能出原创成果，显然不太重要。若教师有这方面的强烈意识，在其教学（包括课堂、实践环节等）中对学生潜移默化，学生身上或许会产生对“紧闭的存在深处”好奇和想象的基因。这种基因能够使他们的想象和探究成为一种自觉意识和习惯，这其实就是一种能力，总体上将来一定会结出原始创新的丰硕之果。

也许有人会质疑，前面论述固然有一定道理，但如果很难实践，则意义不大。其实，真正从操作层面讲，前面所言无需增加学时，无需特别的教师，甚至无需特别的教材（若在新的教材中添加一些表现这种思想的案例自然更好）。一个普通的专业教师只要愿意都能很容易具备前述的意识，而且能够在课堂上和案例中把这种意识很容易地传递给学生。

## 结语

工程教育改革的重要任务之一是要改变工科教育中普遍存在的就技术论技术的现象，把工程技术之“道”真正融入教育活动中。

从存在的视角看工程技术恐怕是最重要的工程技术之道和工程教育之道。工程教育中让学生建立“存在”意识有助于学生从更高的层次认识工程与技术的意义。另外，引导学生在存在的显处、隐处以及“紧闭的存在深处”观察和探究问题乃是培养创新能力最有效的途径。

（文章来源：《高等工程教育研究》2019 年第 4 期，2019 年 8 月）

## 参考文献

[1] 埃德蒙德·胡塞尔．欧洲科学的危机与超验现象学 [M]. 上海译文出版社，2005.

[2] 卡尔•米切姆．技术哲学 [M]// 吴国盛．技术哲学经典读本．上海交通大学出版社，2008：8.

[3] 吴国盛．技术的本质 [EB/OL].2007 年 4 月 9 日在中国传媒大学博士生课堂上的演讲．http://blog.sina.com.cn/s/ blog_51fdc0620100b8mn. html.

[4] 陆有铨．躁动的百年，20 世纪的教育历程 [M]. 北京大学出版社，2012：64.

[5] 船舷，数字生命 非生物生命进化之谜 [N]. 光明日报， 2014-01-23(12).

[6] 弗里德里希·德绍尔．技术的恰当领域 [M]. 张东林，译 // 吴国盛．技术哲学经典读本．上海交通大学出版社，2008：465.

[7] 敖德嘉·加塞特．关于技术的思考 [M]. 高源厚，译 // 吴国盛．技术哲学经典读本．上海交通大学出版社，2008：272，274-275.

# 深度丨中国工程院提出新一代智能制造

近期，中国工程院院刊《Engineering》推出最新观点性文章“走向新一代智能制造”，作者周济、李培根、周艳红等，文章指出智能制造是一个不断演进发展的大概念，可归纳为三个基本范式：数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。新一代智能制造是新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合，是新一轮工业革命的核心驱动力。“人－信息－物理系统”（HCPS）揭示了新一代智能制造的技术机理，能够有效指导新一代智能制造的理论研究和工程实践。推进制造业智能转型应采取“并行推进、融合发展”的技术路线。

## 走向新一代智能制造

**致谢**

感谢路甬祥、潘云鹤、朱高峰、吴澄、李伯虎、柳百成、王天然、卢秉恒、谭建荣、杨华勇、李德群、段正澄、蒋庄德、林忠钦、马伟明、丁荣军、高金吉、刘永才、冯培德、柴天佑、孙优贤、袁晴棠、钱峰、屈贤明、邵新宇、董景辰、朱森第、蔡惟慈、张纲、黄群慧、吕薇、余晓晖、宁振波、赵敏、郭朝晖、李义章等各位专家所作出的贡献。

感谢延建林、胡楠、古依莎娜、杨晓迎、徐静、刘默、刘丽辉、韦莎、马原野、张欣等各位同事所作出的贡献。

本研究由中国工程院重大咨询研究项目（2017-ZD-08）资助，特此感谢。

**摘要**

智能制造是一个不断演进发展的大概念，可归纳为三个基本范式：数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。新一代智能制造是新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合，贯穿于产品设计、制造、服务全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成，不断提升企业的产品质量、效益、服务水平，减少资源能耗，是新一轮工业革命的核心驱动力，是今后数十年制造业转型升级的主要路径。“人－信息－物理系统”（HCPS）揭示了新一代智能制造的技术机理，能够有效指导新一代智能制造的理论研究和工程实践。基于智能制造三个基本范式次第展开、相互交织、迭代升级的特征，推进制造业智能转型应采取“并行推进、融合发展”的技术路线。

**关键词：**先进制造，新一代智能制造，人－信息－物理系统，新一代人工智能，基本范式，并行推进，融合发展

## 1、引言

面对新一轮工业革命，《中国制造 2025》明确提出，要以新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向 [1]。世界各国都在积极采取行动，美国提出“先进制造业伙伴计划”[2, 3]、德国提出“工业 4.0 战略计划”[4]、英国提出“工业 2050”[5]、法国提出“新工业法国计划”[6]、日本提出“社会 5.0 战略”[7]、韩国提出“制造业创新 3.0 计划”[8]，都将发展智能制造作为本国构建制造业竞争优势的关键举措。

新世纪以来，新一代信息技术呈现爆发式增长，数字化网络化智能化技术在制造业广泛应用，制造系统集成式创新不断发展，形成了新一轮工业革命的主要驱动力。特别是，新一代智能制造作为新一轮工业革命的核心技术，正在引发制造业在发展理念、制造模式等方面重大而深刻的变革，正在重塑制造业的发展路径、技术体系以及产业业态，从而推动全球制造业发展步入新阶段 [9-13]。

## 2. 智能制造的三个基本范式

广义而论，智能制造是一个大概念 [10, 14]，是先进信息技术与先进制造技术的深度融合，贯穿于产品设计、制造、服务等全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成，旨在不断提升企业的产品质量、效益、服务水平，减少资源消耗，推动制造业创新、绿色、协调、开放、共享发展。

数十年来，智能制造在实践演化中形成了许多不同的相关范式，包括精益生产、柔性制造、并行工程、敏捷制造、数字化制造、计算机集成制造、网络化制造、云制造、智能化制造等 [15-23]，在指导制造业技术升级中发挥了积极作用。但同时，众多的范式不利于形成统一的智能制造技术路线，给企业在推进智能升级的实践中造成了许多困扰。面对智能制造不断涌现的新技术、新理念、新模式，有必要归纳总结提炼出基本范式。

智能制造的发展伴随着信息化的进步。全球信息化发展可分为三个阶段：从上世纪中叶到 90 年代中期，信息化表现为以计算、通讯和控制应用为主要特征的数字化阶段；从上世纪九十年代中期开始，互联网大规模普及应用，信息化进入了以万物互联为主要特征的网络化阶段；当前，在大数据、云计算、移动互联网、工业互联网集群突破、融合应用的基础上，人工智能实现战略性突破，信息化进入了以新一代人工智能技术为主要特征的智能化阶段 [24]。

综合智能制造相关范式，结合信息化与制造业在不同阶段的融合特征，可以总结、归纳和提升出三个智能制造的基本范式，也就是：数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。

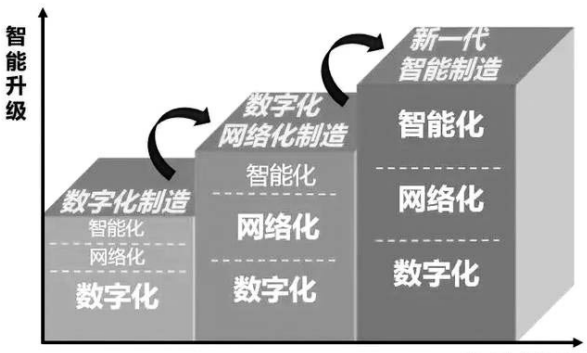



图 1 智能制造三个基本范式演进

### 2.1 数字化制造

数字化制造是智能制造的第一个基本范式，也可称为第一代智能制造。

智能制造的概念最早出现于上世纪 80 年代

[25]，但是由于当时应用的第一代人工智能技术还难以解决工程实践问题，因而那一代智能制造主体上是数字化制造。

上世纪下半叶以来，随着制造业对于技术进步的强烈需求，以数字化为主要形式的信息技术广泛应用于制造业，推动制造业发生革命性变化。数字化制造是在数字化技术和制造技术融合的背景下，通过对产品信息、工艺信息和资源信息进行数字化描述、分析、决策和控制，快速生产出满足用户要求的产品 [15, 16, 26, 27]。

数字化制造的主要特征表现为：第一，数字技术在产品中得到普遍应用，形成“数字一代”创新产品；第二，广泛应用数字化设计、建模仿真、数字化装备、信息化管理；第三，实现生产过程的集成优化。

需要说明的是，数字化制造是智能制造的基础，其内涵不断发展，贯穿于智能制造的三个基本范式和全部发展历程。这里定义的数字化制造是作为第一种基本范式的数字化制造，是一种相对狭义的定位。国际上也有若干关于数字化制造的比较广义的定义和理论 [28]。

### 2.2 数字化网络化制造

数字化网络化制造是智能制造的第二种基本范式，也可称为“互联网 + 制造”，或第二代智能制造 [29]。

上世纪末互联网技术开始广泛应用，“互联网 +”不断推进互联网和制造业融合发展，网络将人、流程、数据和事物连接起来，通过企业内、企业间的协同和各种社会资源的共享与集成，重塑制造业的价值链，推动制造业从数字化制造向数字化网络化制造转变 [17, 30-33]。

数字化网络化制造主要特征表现为：第一，在产品方面，数字技术、网络技术得到普遍应用，产品实现网络连接，设计、研发实现协同与共享。第二，在制造方面，实现横向集成、纵向集成和端到端集成，打通整个制造系统的数据流、信息流。第三，在服务方面，企业与用户通过网络平台实现联接和交互，企业生产开始从以产品为中心向以用户为中心转型 [34]。

德国“工业 4.0”报告和美国 GE“工业互联网”报告完整地阐述了数字化网络化制造范式，精辟地提出了实现数字化网络化制造的技术路线 [4, 9, 31, 35-39]。

### 2.3 新一代智能制造——数字化网络化智能化制造

数字化网络化智能化制造是智能制造的第三种基本范式，也可称为新一代智能制造。

近年来，在经济社会发展强烈需求以及互联网的普及、云计算和大数据的涌现、物联网的发展等信息环境急速变化的共同驱动下，大数据智能、人机混合增强智能、群体智能、跨媒体智能等新一代人工智能技术加速发展，实现了战略性突破 [24, 40, 41]。新一代人工智能技术与先进制造技术深度融合，形成新一代智能制造——数字化网络化智能化制造。新一代智能制造将重塑设计、制造、服务等产品全生命周期的各环节及其集成，催生新技术、新产品、新业态、新模式，深刻影响和改变人类的生产结构、生产方式乃至生活方式和思维模式，实现社会生产力的整体跃升。新一代智能制造将给制造业带来革命性的变化，将成为制造业未来发展的核心驱动力。

智能制造的三个基本范式体现了智能制造发展的内在规律：一方面，三个基本范式次第展开，各有自身阶段的特点和要重点解决的问题，体现着先进信息技术与先进制造技术融合发展的阶段性特征；另一方面，三个基本范式在技术上并不

是绝然分离的，而是相互交织、迭代升级，体现着智能制造发展的融合性特征。对中国等新兴工业国家而言，应发挥后发优势，采取三个基本范式“并行推进、融合发展”的技术路线。

## 3. 新一代智能制造引领和推动新一轮工业革命

### 3.1 发展背景

当今世界，各国制造企业普遍面临着提高质量、增加效率、降低成本、快速响应的强烈需求，还要不断适应广大用户不断增长的个性化消费需求，应对资源能源环境约束进一步加大的挑战。然而，现有制造体系和制造水平已经难以满足高端化、个性化、智能化产品和服务增值升级的需求，制造业的进一步发展面临巨大瓶颈和困难。解决问题，迎接挑战，迫切需要制造业的技术创新、智能升级 [14, 41]。

新一轮工业革命方兴未艾，其根本动力在于新一轮科技革命。新世纪以来，移动互联、超级计算、大数据、云计算、物联网等新一代信息技术日新月异、飞速发展 [11, 12, 42-48]，并极其迅速地普及应用，形成了群体性跨越。这些历史性的技术进步，集中汇聚在新一代人工智能技术的战略性突破，实现了质的飞跃 [24]。新一代人工智能呈现出深度学习、跨界协同、人机融合、群体智能等新特征，为人类提供认识复杂系统的新思维、改造自然和社会的新技术。当然，新一代人工智能技术还在极速发展的进程中，将继续从“弱人工智能”迈向“强人工智能”，不断拓展人类“脑力”，应用范围将无所不在。新一代人工智能已经成为新一轮科技革命的核心技术，为制造业革命性的产业升级提供了历史性机遇，正在形成推动经济社会发展的巨大引擎。世界各国都把新一代人工智能的发展摆在了最重要的位置 [49, 50]。

新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合，形成了新一代智能制造技术，成为了新一轮工业革命的核心驱动力。

### 3.2 新一代智能制造是新一轮工业革命的核心技术

科学技术是第一生产力，科技创新是经济社会发展的根本动力。第一次工业革命和第二次工业革命分别以蒸汽机和电力的发明和应用为根本动力，极大地提高了生产力，人类社会进入了现代工业社会。第三次工业革命，以计算、通讯、控制等信息技术的创新与应用为标志，持续将工业发展推向新高度 [51]。

新世纪以来，数字化和网络化使得信息的获取、使用、控制以及共享变得极其快速和普及，进而，新一代人工智能突破和应用进一步提升了制造业数字化网络化智能化的水平，其最本质的特征是具备认知和学习的能力，具备生成知识和更好地运用知识的能力，这样就从根本上提高工业知识产生和利用的效率，极大地解放人的体力和脑力，使创新的速度大大加快，应用的范围更加泛在，从而推动制造业发展步入新阶段，即数字化网络化智能化制造——新一代智能制造。如果说数字化网络化制造是新一轮工业革命的开始，那么新一代智能制造的突破和广泛应用将推动形成新工业革命的高潮，将重塑制造业的技术体系、生产模式、产业形态，并将引领真正意义上的“工业 4.0”，实现新一轮工业革命。

### 3.3 愿景

制造系统将具备越来越强大的智能，特别是越来越强大的认知和学习能力，人的智慧与机器智能相互启发性地增长，使制造业的知识型工作

向自主智能化的方向发生转变，进而突破当今制造业发展所面临的瓶颈和困难。

新一代智能制造中，产品呈现高度智能化、宜人化，生产制造过程呈现高质、柔性、高效、绿色等特征，产业模式发生革命性的变化，服务型制造业与生产型服务业大发展，进而共同优化集成新型制造大系统，全面重塑制造业价值链，极大提高制造业的创新力和竞争力。

新一代智能制造将给人类社会带来革命性变化。人与机器的分工将产生革命性变化，智能机器将替代人类大量体力劳动和相当部分的脑力劳动，人类可更多地从事创造性工作；人类工作生活环境和方式将朝着以人为本的方向迈进。同时，新一代智能制造将有效减少资源与能源的消耗和浪费，持续引领制造业绿色发展、和谐发展。

## 4. 新一代智能制造的技术机理："人－信息－物理系统"（HCPS）

智能制造涉及智能产品、智能生产以及智能服务等多个方面及其优化集成。从技术机理角度看，这些不同方面尽管存在差异，但本质上是一致的，下面以生产过程为例进行分析。

### 4.1 传统制造与"人－物理系统"

传统制造系统包含人和物理系统两大部分，是完全通过人对机器的操作控制去完成各种工作任务（如图 2(a) 所示）。动力革命极大提高了物理系统（机器）的生产效率和质量，物理系统（机器）代替了人类大量体力劳动。传统制造系统中，要求人完成信息感知、分析决策、操作控制以及认知学习等多方面任务，不仅对人的要求高，劳动强度仍然大，而且系统工作效率、质量和完成复杂工作任务的能力还很有限。传统制造系统可抽象描述为图2(b) 所示的"人－物理系统"（HPS—Human-Physical Systems）。

### 4.2 数字化制造、数字化网络化制造与"人－信息－物理系统"

与传统制造系统相比，第一代和第二代智能制造系统发生的本质变化是，在人和物理系统之间增加了信息系统，信息系统可以代替人类完成部分脑力劳动，人的相当部分的感知、分析、决策功能向信息系统复制迁移，进而可以通过信息系统来控制物理系统，以代替人类完成更多的体

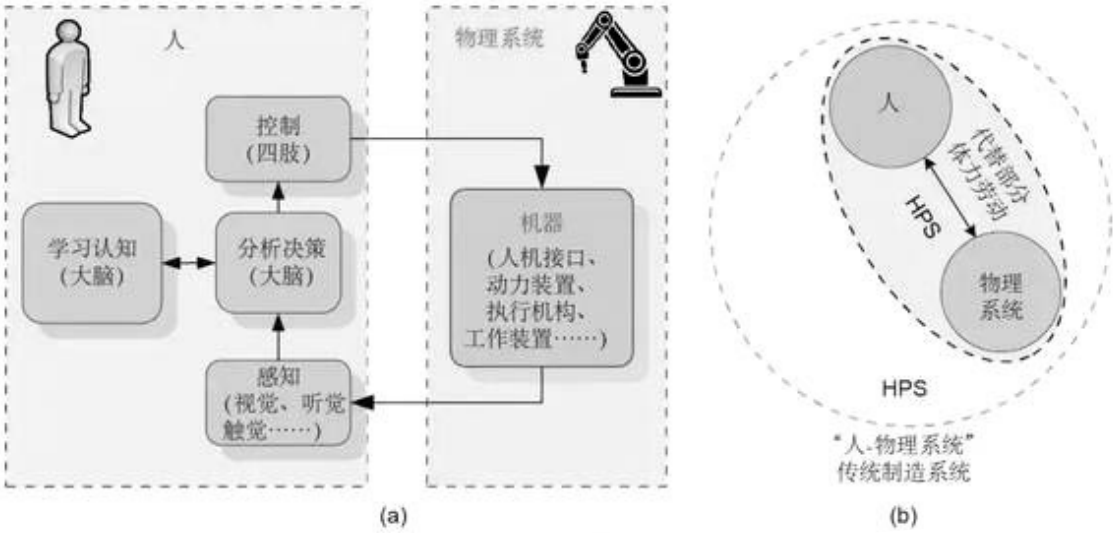



图2. 传统制造系统与"人-物理系统"。

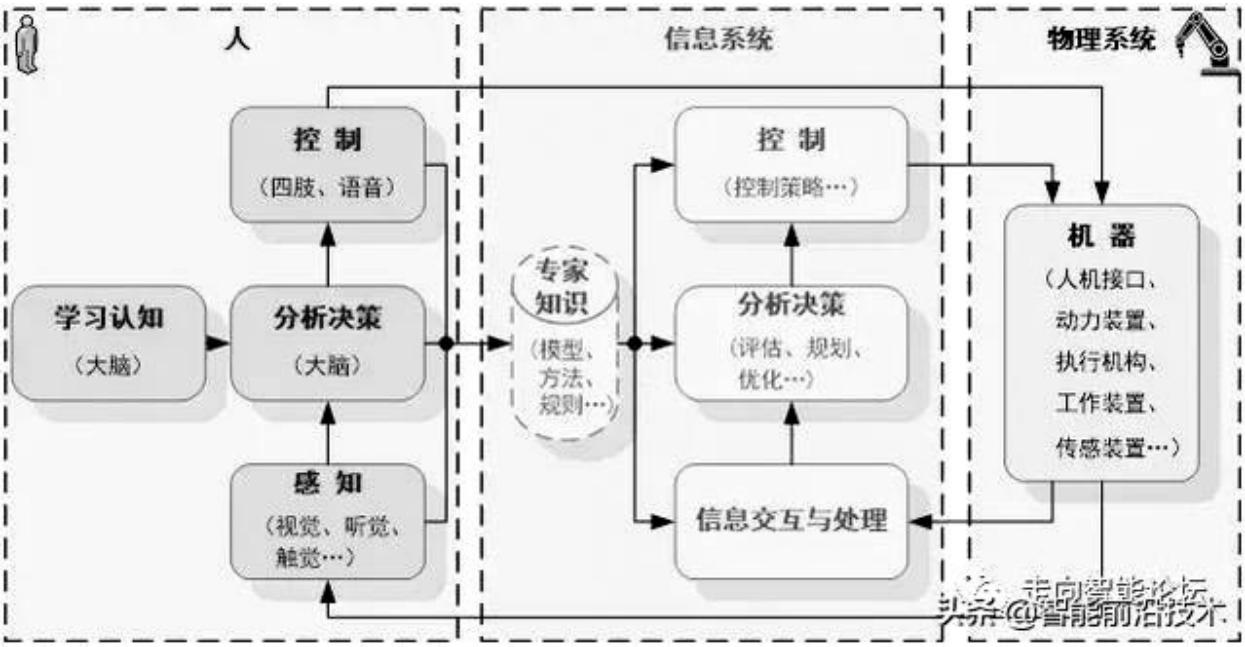



图 3 第一代和第二代智能制造系统

力劳动，如图 3 所示。

第一代和第二代智能制造系统通过集成人、信息系统和物理系统的各自优势，系统的能力尤其是计算分析、精确控制以及感知能力都得以很大提高。一方面，系统的工作效率、质量与稳定性均得以显著提升；另一方面，人的相关制造经验和知识转移到信息系统，能够有效提高人的知识的传承和利用效率。制造系统从传统的“人－物理系统”向“人－信息－物理系统”（HCPS—Human-Cyber-Physical Systems）的演变可进一步用图 4 进行抽象描述 [11, 52, 53]。

信息系统（Cyber system）的引入使得制造系统同时增加了“人－信息系统”（HCS—Human-Cyber Systems）和“信息－物理系统”（CPS—Cyber-Physical Systems）。其中，“信息－物理系统”（CPS）是非常重要的组成部分。美国在本世纪初提出了 CPS 的理论 [54]，德国将其作为工业 4.0 的核心技术。“信息－物理系统”（CPS）在工程上的应用是实现信息系统和物理系统的完美映射和深度融合，“数字孪生体”（Digital Twin）即是

最为基本而关键的技术，由此，制造系统的性能与效率可大大提高 [13, 30, 37, 55, 56]。

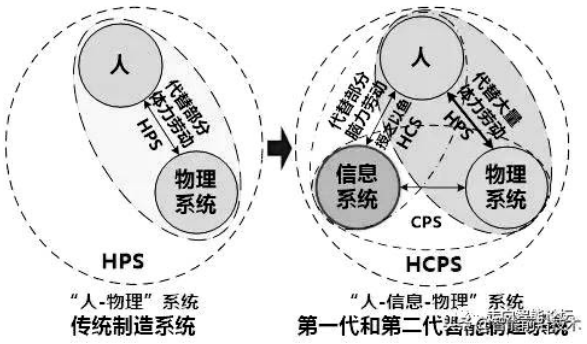



图 4 从“人－物理系统”到“人－信息－物理系统”

### 4.3 新一代智能制造与新一代“人－信息－物理系统”

新一代智能制造系统最本质的特征是其信息系统增加了认知和学习的功能，信息系统不仅具有强大的感知、计算分析与控制能力，更具有了学习提升、产生知识的能力，如图 5 所示。

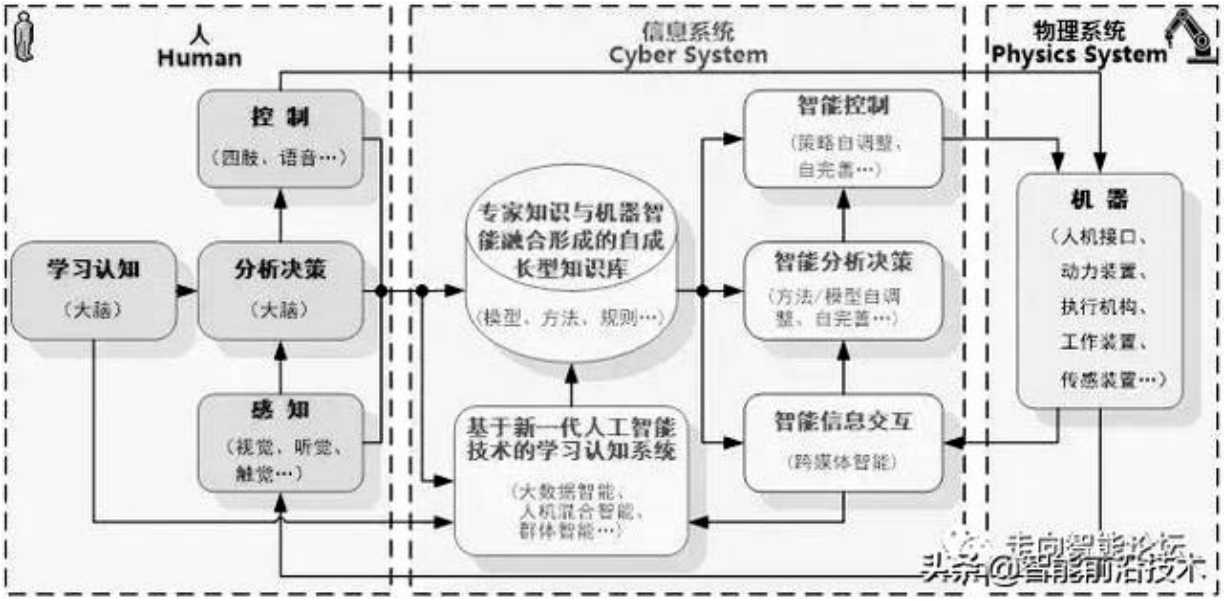



图 5 新一代智能制造系统的基本机理

在这一阶段，新一代人工智能技术将使“人－信息－物理系统”发生质的变化，形成新一代“人－信息－物理系统”（如图 6 所示）。主要变化在于：第一，人将部分认知与学习型的脑力劳动转移给信息系统，因而信息系统具有了“认知和学习”的能力，人和信息系统的关系发生了根本性的变化，即从“授之以鱼”发展到“授之以渔”；第二，通过“人在回路”的混合增强智能，人机深度融合将从本质上提高制造系统处理复杂性、不确定性问题的能力，极大优化制造系统的性能[52, 57]。

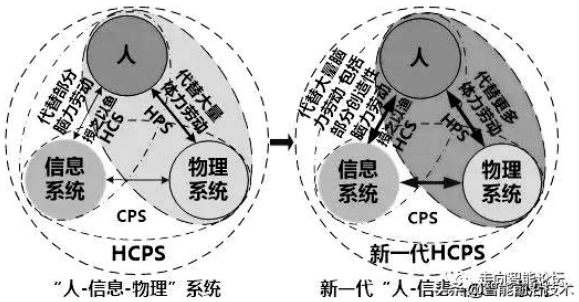



图 6 新一代“人－信息－物理系统”

新一代“人－信息－物理系统”中，HCS、HPS 和 CPS 都将实现质的飞跃。

新一代智能制造，进一步突出了人的中心地位，是统筹协调“人”、“信息系统”和“物理系统”的综合集成大系统；将使制造业的质量和效率跃升到新的水平，为人民的美好生活奠定更好的物质基础；将使人类从更多体力劳动和大量脑力劳动中解放出来，使得人类可以从事更有意义的创造性工作，人类社会开始真正进入“智能时代”[10-12, 51]。

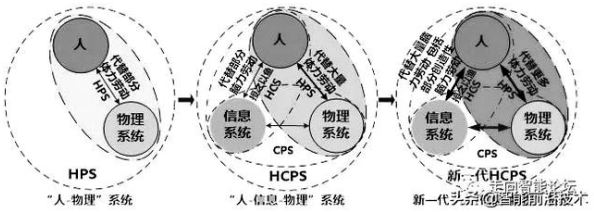



图 7 从“人－物理系统”到新一代“人－信息－物理系统”

总之，制造业从传统制造向新一代智能制造发展的过程是从原来的“人－物理”二元系统向新一代“人－信息－物理”三元系统进化的过程（图 7 所示）。新一代“人－信息－物理系统”

揭示了新一代智能制造的技术机理，能够有效指导新一代智能制造的理论研究和工程实践。

## 5. 新一代智能制造的系统组成与系统集成

新一代智能制造是一个大系统，主要由智能产品、智能生产及智能服务三大功能系统以及工业智联网和智能制造云两大支撑系统集合而成（如图 8 所示）。

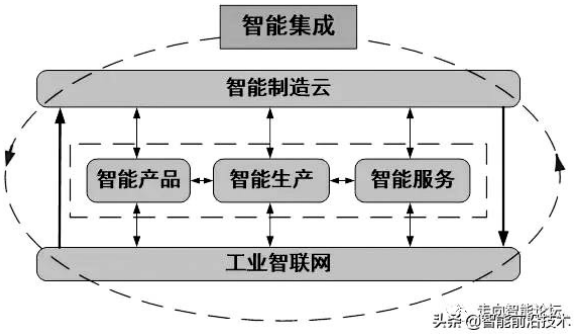



图 8 新一代智能制造的系统集成

新一代智能制造技术是一种核心使能技术，可广泛应用于离散型制造和流程型制造的产品创新、生产创新、服务创新等制造价值链全过程创新与优化。

### 5.1 智能产品与制造装备

产品和制造装备是智能制造的主体，其中，产品是智能制造的价值载体，制造装备是实施智能制造的前提和基础 [58]。

新一代人工智能和新一代智能制造将给产品与制造装备创新带来无限空间，使产品与制造装备产生革命性变化，从〝数字一代〞整体跃升至〝智能一代〞。从技术机理看，〝智能一代〞产品和制造装备也就是具有新一代 HCPS 特征的、高度智能化、宜人化、高质量、高性价比的产品与制造装备。

设计是产品创新的最重要环节，智能优化设计、智能协同设计、与用户交互的智能定制、基于群体智能的“众创”等都是智能设计的重要内容。研发具有新一代 HCPS 特征的智能设计系统也是发展新一代智能制造的核心内容之一。

### 5.2 智能生产

智能生产是新一代智能制造的主线 [40, 59, 60]。

智能产线、智能车间、智能工厂是智能生产的主要载体 [61-63]。新一代智能制造将解决复杂系统的精确建模、实时优化决策等关键问题，形成自学习、自感知、自适应、自控制的智能产线、智能车间和智能工厂，实现产品制造的高质、柔性、高效、安全与绿色。

### 5.3 智能服务

以智能服务为核心的产业模式变革是新一代智能制造的主题 [64, 65]。

在智能时代，市场、销售、供应、运营维护等产品全生命周期服务，均因物联网、大数据、人工智能等新技术而赋予其全新的内容。

新一代人工智能技术的应用将催生制造业新模式、新业态：一是，从大规模流水线生产转向规模化定制生产；二是，从生产型制造向服务型制造转变，推动服务型制造业与生产型服务业大发展，共同形成大制造新业态。制造业产业模式将实现从以产品为中心向以用户为中心的根本性转变，完成深刻的供给侧结构性改革。

### 5.4 智能制造云与工业智联网

智能制造云和工业智联网是支撑新一代智能制造的基础 [9, 20, 31, 44, 66, 67]。

随着新一代通讯技术、网络技术、云技术和人工智能技术的发展和应用，智能制造云和工业智联网将实现质的飞跃。智能制造云和工业智联网将由智能网络体系、智能平台体系和智能安全

体系组成，为新一代智能制造生产力和生产方式变革提供发展的空间和可靠的保障 [68]。

### 5.5 系统集成

新一代智能制造内部和外部均呈现出前所未有的系统“大集成”特征：

一方面是制造系统内部的“大集成”。企业内部设计、生产、销售、服务、管理过程等实现动态智能集成，即纵向集成；企业与企业之间基于工业智联网与智能云平台，实现集成、共享、协作和优化，即横向集成 [69-72]。

另一方面是制造系统外部的“大集成”。制造业与金融业、上下游产业的深度融合形成服务型制造业和生产性服务业共同发展的新业态。智能制造与智能城市、智能农业、智能医疗乃至智能社会交融集成，共同形成智能制造“生态大系统”。

新一代智能制造系统大集成具有大开放的显著特征，具有集中与分布、统筹与精准、包容与共享的特性，具有广阔的发展前景。

## 6. 并行推进、融合发展——中国推进智能制造的技术路线

在西方发达国家，智能制造是一个“串联式”的发展过程，他们是用几十年时间充分发展数字化制造之后，再发展数字化网络化制造，进而迈向更高级的智能制造阶段 [16]。在中国，制造业对于智能升级有着极为强烈的需求，近年来技术进步也很快，但是总体而言，中国智能制造的基础非常薄弱，大多数企业，特别是广大中小企业，还没有完成数字化制造转型。面对这样的现实，中国如何推进制造业的技术改造、智能升级？

首先，必须实事求是，中国企业在推进智能升级的过程中要踏踏实实地完成数字化“补课”，夯实智能制造发展的基础；同时，不必走西方发达国家“顺序发展”的路径，努力探索一条智能制造跨越式发展的新路。

近几年，中国制造业界大力推进“互联网 + 制造”。一方面， 一批数字化制造基础较好的企业成功转型，实现了数字化网络化制造；另一方面， 部分原来还未实现数字化制造的企业，则采用并行推进数字化制造和数字化网络化制造的技术路线，在完成了数字化制造“补课”的同时，成功实现了向数字化网络化制造的跨越。这给我们提供了成功的经验。

中国推进智能制造，应采取“并联式”的发展方式，采用“并行推进、融合发展”的技术路线：并行推进数字化制造、数字化网络化制造、新一代智能制造，以及时充分应用高速发展的先进信息技术和先进制造技术的融合式技术创新，引领和推进中国制造业的智能转型。

未来若干年，考虑到中国智能制造发展的现状，也考虑到新一代智能制造技术还不成熟，中国制造业转型升级的工作重点要放在大规模推广和全面应用“互联网 + 制造”；同时，在大力普及“互联网 + 制造”的过程中，要特别重视各种先进技术的融合应用，“以高打低、融合发展”。一方面，使得广大企业都能高质量完成“数字化补课”；另一方面，尽快尽好应用新一代智能制造技术，大大加速制造业转型升级的速度。

再过若干年，在新一代智能制造技术基本成熟之后，中国制造业将进入全面推广应用普及新一代智能制造的新阶段。

我国在推动三个基本范式“融合发展”时，必须制定统一的标准。未来数十年，我国企业在智能升级过程中，将普遍面临多次范式转化和技术升级，必须高度重视制定和实行智能制造的相

关标准，为后续发展做好准备，避免企业的低水平重复建设，有利于我国推进智能制造的分阶段实施和不断升级。

在实施“并行推进、融合发展”这一技术路线的过程中，要强调“五个坚持”的方针。

一是坚持“创新引领”。紧紧抓住新一代智能制造带来的历史性机遇，充分利用互联网、大数据、人工智能等先进技术，瞄准高端方向，加快研究、开发、示范、推广和应用新一代智能制造技术，用创新引领和推动制造业生产质量和效率提升，实现中国制造业由大变强。

二是坚持“因企制宜”。推动智能制造，要充分激发企业的内生动力。中国的企业参差不齐，实现智能转型不能搞“一刀切”，各个企业特别是广大中小企业，要结合企业发展实情，充分考虑技术先进性和技术经济性的平衡，实事求是地应用适合自己转型升级的技术路径。

三是坚持“产业升级”。推动智能制造不能仅仅停留在典型、示范、部分制造环节或者部分制造领域，而是要着眼于广大企业、各个行业和整个制造产业，推动中国制造业质量变革、效率变革、动力变革，实现中国制造业全方位的智能化转型升级。

四是坚持建设良好的发展生态。各级政府、科技界、学界、金融界等社会各界要共同营造良好的生态环境，帮助和支持企业特别是广大中小企业的智能升级。营造“大众创业、万众创新”的良好环境；建设“用产学研金政”紧密结合的智能制造技术创新体系；形成从事推广应用各种共性使能技术和提供系统解决方案的新兴企业集群。

推进智能制造成败的关键在于人才，要以人为本，动员各方力量，努力培养一代智能制造优秀人才。

五是坚持开放与协同创新。中国制造业界要不断扩大与世界各国制造业界的交流，实行更高水平的开放。中国的市场是开放的市场，中国的创新体系是开放的创新体系。我们要和世界制造业的同行们共同努力，共同推进新一代智能制造，共同推进新一轮工业革命，使制造业更好地为人类造福。

（文章来源：智造参考，2019 年 7 月）

（上接第 18 页）

也为未来工业工程专业的发展奠定了坚实的基础。

**系列活动三：**工业工程专业研讨会

7 月 26 日上午，中国机械工程学会及其工业工程分会召开了工业工程研讨会。会议由教学指导委员会副主任王金凤教授主持。会上，周德群教授、王金凤教授、鲁建厦教授、张顺堂教授，以及上海纤科集团总经理李晚华先生、北京理工大学珠海学院周大为教授、天津高等职业技术学院王艳君老师，分别作了“全力打造工业工程金牌专业 -- 引领学科建设发展”、“从德国工匠精神 / 中国制造 2025 到我国工业工程类专业的人才培养”、“智能制造背景下的工业工程发展思考”、“工业工程面临的机遇和挑战”、“IE 人才培养探讨”、“推广普及工业工程的一点做法与体会”以及“工业工程在高职院校的推广”的报告。

齐二石教授作会议总结，并对工业工程发展提出几点希望。会后，会议代表一行参观了吉利汽车晋中有限公司。

（文章来源：工业工程分会，本文有删改，2019 年 8 月）

# 2D 数字伺服阀及其数字控制技术

## ——浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室

2D 数字伺服阀利用伺服螺旋机构将阀芯的旋转运动转化阀芯的直线位移（阀开口），其结构独特，体积小，重量轻，抗污染能力强，响应速度快，具有双冗余度。采用闭环同步跟踪控制算法，实现了其电—机械转换器输出无失步快速精确地跟随输入信号的运动，拓宽了其频宽。采用数字控制技术，不仅减小或消除了滞环和死区，改善了阀本身的动静态性能，而且降低了对加工工艺的要求，降低生产成本。

### 一、导言

电液伺服阀作为电液伺服控制系统的关键元件，其性能在很大程度上决定了整个电液控制系统的性能。传统的电液伺服阀主要有喷嘴—挡板阀、射流管阀、动圈式伺服阀、电液比例伺服阀等。喷嘴—挡板阀动态响应速度很快，但是其抗污染能力差，对液体介质的清洁度要求十分苛刻；而射流管阀虽然其抗污染能力在一定程度上有所增强，但却以泄漏功耗更大为代价，其频响也较喷嘴—挡板阀为低；至于比例伺服阀，其对油液的清洁度要求低于电液伺服阀，但是其动态性能介于伺服阀和普通比例阀之间，动态响应仍较喷嘴—挡板伺服阀差。随着航空、航天及现代工业的需要对电液伺服阀提出更高的技术要求：如更强的抗油液污染能力、高频响、大流量、使用方便和成本低等。传统的电液伺服阀已经难以达到这些要求，新型电液伺服阀的研制始终成为流体控制领域发展的重要课题。

进入信息时代后，机电控制技术的数字化成为必然的发展趋势和人们的共识。电液控制系统实现数字控制有间接和直接两种方法。间接的方法是利用计算机通过 D/A 转换器实现对模拟式电液控制元件（比例阀或伺服阀）的数字控制。直接的方法则在电液控制系统中应用数字阀。数字阀以步进电动机作为电—机械转换接口。步进电动机是一种数字执行元件，它将电脉冲信号转换为角位移信号，因此，它是一种数字式电—机械转换器。步进电动机作为电－机械接口便于实现电液伺服系统数字化控制，其具有数字控制的一般优点，如无需 D/A 转换器、信号传递不受外部环境干扰等。显然，采用数字阀是实现电液控制系统数字化更理想的方式，这不仅因为数字阀具有数字控制的一般优点，更重要的是通过嵌入式数字化控制， 可以为电液伺服阀的动静特性的全面提升带来前所未有的机遇。如何把握这一机遇也成为电液控制技术成功与进一步发展的关键所在，这对于高性能的电液伺服阀依靠仿制和大量进口的我国，意义尤为重大。

浙江工业大学自从20世纪90年代以来一直从事2D数字伺服阀及其数字控制的研究，经过20多年的努力已建立了独具特色的具有自主知识产权的数字伺服阀及电液直接数字控制技术的理论体系，形成了完整2D数字伺服阀设计方法。

二、2D数字伺服阀及其数字控制技术

2D数字伺服阀的结构如图1所示。它由阀体、电－机械转换器（步进电动机）、传动机构和角位移传感器等组成。传动机构主要是用来连接电－机械转换器与阀芯，实现运动传递和力矩放大作用。角位移传感器实时检测步进电机转子的角位移，以实现对步进电机转子角位移的闭环同步跟踪控制。

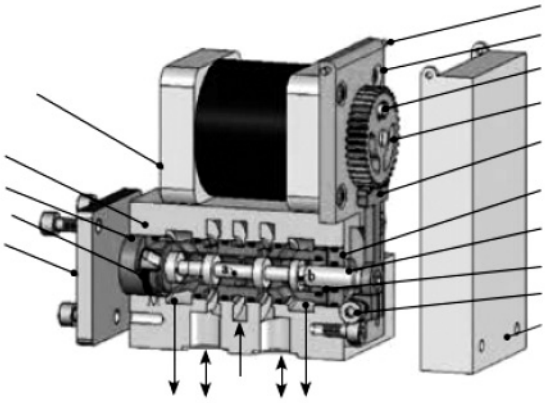


图1 2D数字伺服阀

**1. 2D数字伺服阀的阀体（液压伺服螺旋机构）的研究**

2D伺服阀其阀体部分主要由阀套和阀芯等组成，见图2。其中，P口为进油口，T1口和T2口为回油口，A口和B口为负载口。阀右腔通过小孔b、阀芯杆内通道和小孔a与进油口P相通，右腔压力为进油口的压力（系统压力），而右腔面积在设计上为左敏感腔面积的一半。在阀芯左端台肩上开设有一对高低压孔；在阀芯孔左端开设有一螺旋槽。螺旋槽和高低压孔相交构成一液压阻尼半桥，该液压阻尼半桥控制了阀左敏感腔的压力。在静态时，若不考虑摩擦力及阀口液动力的影响，左敏感腔压力为入口压力的一半，阀芯轴向保持静压平衡，此时，高低压孔与螺旋槽相交的弓形面积相等。当阀芯以逆时针（面对阀芯伸出杆）的方向转动时，高压孔与螺旋槽相交的弓形面积增大，低压孔与螺旋槽相交的弓形面积减小；于是，左敏感腔的压力升高。左敏感腔的压力升高推动阀芯右移。阀芯右移的结果是高低压孔又回到螺旋槽的两侧，高低压孔和螺旋槽的相交面积又 重新相等，左敏感腔的压力恢复为入口压力的一半，阀芯重新保持轴向力平衡。若阀芯以顺时针的方向转动，变化则正好相反。

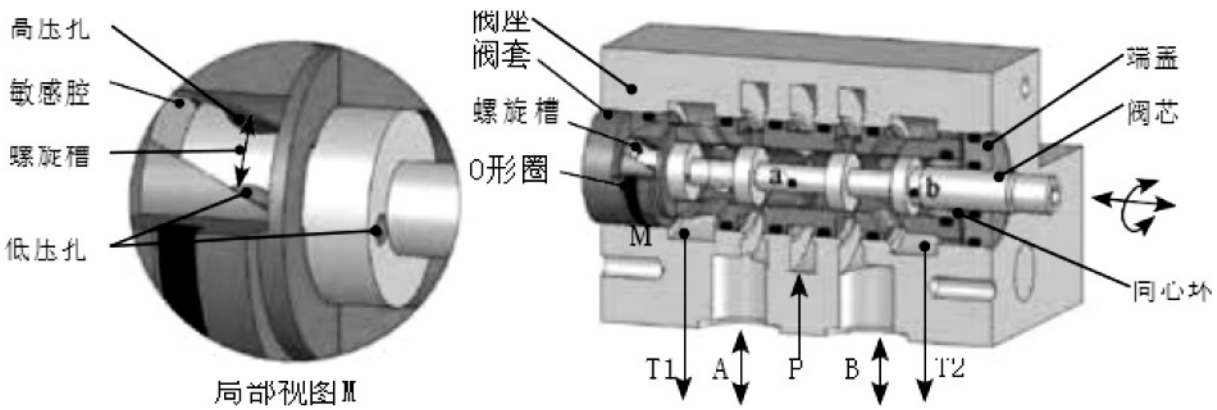



图2 2D数字伺服阀阀体

在2D数字伺服阀中，阀芯角位移与轴向位移（主阀开口）之间的转换运动与普通的机械螺旋机构的转换运动相一致，不同之处在于阀芯的轴向运动由液压驱动，因此实现2D数字伺服阀阀芯转角与轴向位移转换的导控结构也称为液压伺服螺旋机构。从结构和工作原理可以看出2D数字伺服阀为一双级位置反馈液压流量伺服阀。

2D数字伺服阀利用伺服螺旋机构将阀芯的旋转运动转换为阀芯轴向运动从而实现伺服阀液压功率放大，其集导控和主阀芯于单一阀芯上，这种独特的结构使得2D数字伺服阀的结构简单、紧凑，体积和重量远小于传统的电液伺服阀，这一优点使得其在大流量伺服阀以及航空航天、军工等行业的应用具有巨大的优势。另外，2D数字伺服阀的导控由阀芯上高、低压小孔和阀套上的螺旋槽的重叠面积所构成的液压阻尼桥路实现，导控油路孔径比较大，极不容易堵塞，即使某一侧的高压（或低压）重叠区域被堵塞，阀芯的力平衡将被破坏而产生轴向移动，移动的结果将增大被堵塞区域的面积而有利于清除堵塞物，因此，2D数字阀具有很强的抗污染能力。同时，也降低了对加工精度的要求，此外在设计上采用对称的双螺旋槽和两对高低压孔结构的设计，2D数字伺服阀还具有双冗余度，提高了工作可靠性。2D数字伺服阀的结构参数主要有高、低小孔的半径、初始弓高（螺旋槽和高、低孔初始接触高度）、敏感腔长度以及工作压力等。不同的结构参数对阀的动态特性的影响是不一样的。图3给出了不同结构参数对阀频率特性的影响。从图3可以看出，增加初始弓高、高（低）压小孔的半

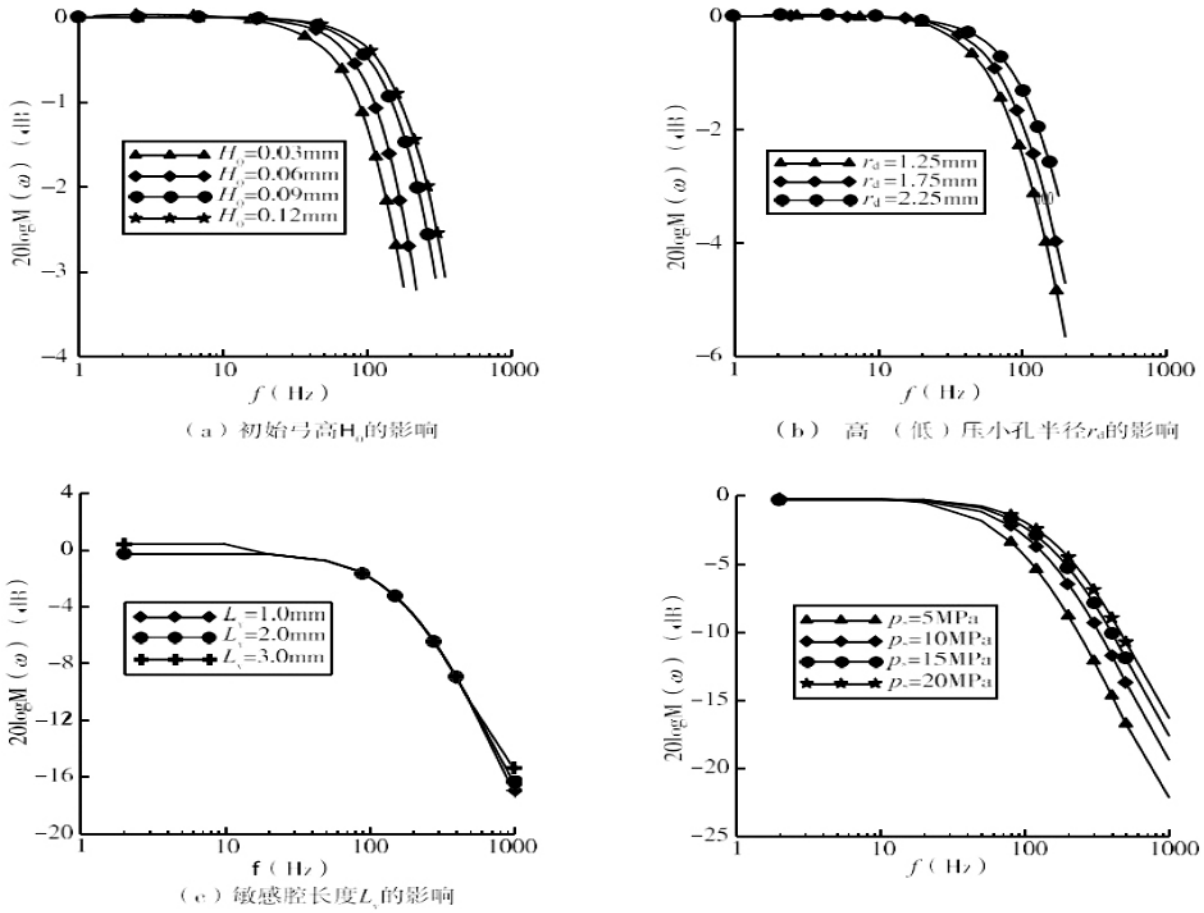



图3 不同结构参数对阀频率特性的影响

径以及系统工作压力可以提高阀的响应速度和频宽，而敏感腔长度对阀的响应速度和频宽无明显作用。

## 2. 2D 数字阀的电－机械转换器控制的研究

2D 数字伺服阀多采用步进电动机作为电－机械转换器。图 4 为两相混合式步进电动机的结构图。步进电动机传统上以步进的方式工作时阀的分辨率有限，虽然采用细分的方式可以提高阀的分辨率，但降低了阀的频响，存在着阀的分辨率和响应速度之间的矛盾，因此， 步进电动机作为 2D 数字伺服阀电－机械转换器，需采用新的工作方式。

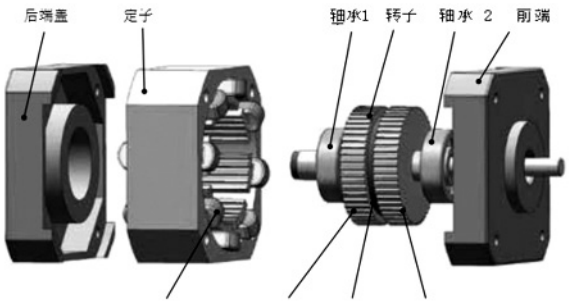



图 4 两相混合式步进电动机结构图

实际上，混合式步进电动机从原理上讲是永磁感应子式同步电动机。它通过转子分段错齿和转子轴向永磁励磁，在结构上实现了多极对数永磁感应子式同步电动机的思想。因此，我们可以采用同步电机的工作原理实现对步进电动机的同步控制。其工作原理如图 5 所示。 当 A、B 两相绕组中通入相位差为 π/2 的正弦电流 ia、ib，则在步进电动机内部产生一旋转磁场 θm。在此旋转磁场 θm 作用下，转子同步转动，输出角位移 θ。当两相绕组中的电流交变一个周期，转子转过一个齿距。因此，如果能控制步进电动机绕组的电流 ia、ib，也就控制了步 进电动机内部的旋转磁场 θm，从而控制了步进电动机转子的位置 θ，实现转子在任意位置快速精确定位。为了防止步进电动机失步，失调角在工作中必须被限制在（-π）～ π 之间（± 半个齿 距角）。由于在失调角 ±π/2 处，输出转矩最大，因此，失调角一般在限制（-π/2）～（π/2） 之间。要做到这一点，必须实时检测步进电动机转子的角位移，然后通过限制旋转磁场 θm（通过控制两相绕组的电流来实现）使失调角满足上式，实现旋转磁场对转子角位移的跟踪控制。

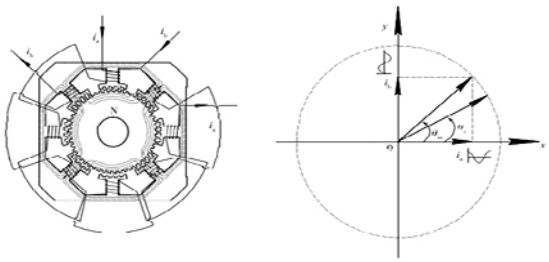


图 5 2D 数字伺服阀电 － 机械转换器工作原理

根据上述分析，为了保证步进电动机作为电－机械转换器既有较高的响应速度，同时又保证其转子的输出角位移可以在任意点精确快速定位，在这里提出同步跟踪控制算法，如图 6 所示。在同步跟踪控制算法下，步进电动机转子角位移

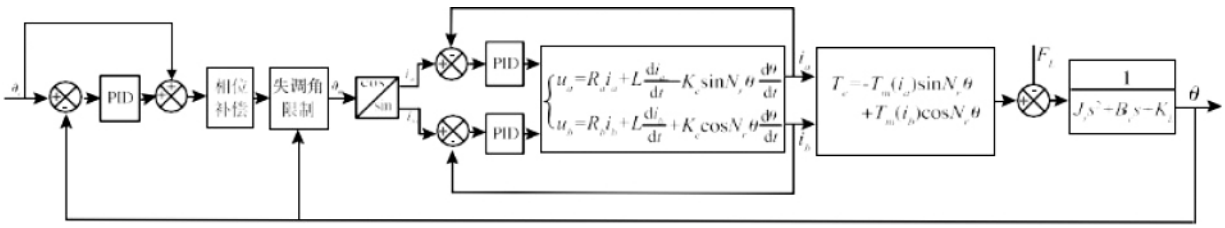



图 6 2D 数字伺服阀电 － 机械转换器闭环同步跟踪控制算法

能够无失步地快速精确地跟随输入控制信号的运动。图 7 和图 8 分别为同步跟踪控制下的输入输出特性和频率特性。

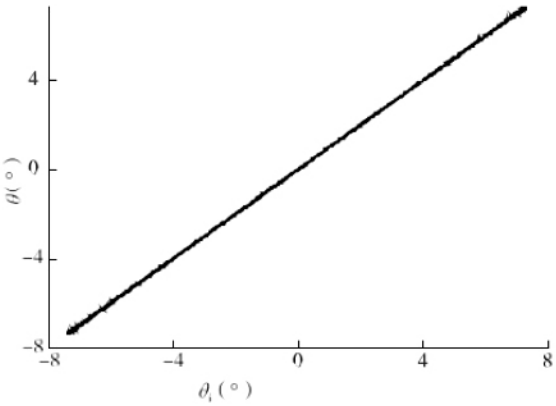



图 7 2D 满幅值 0.1Hz 正弦信号下输入输出特性

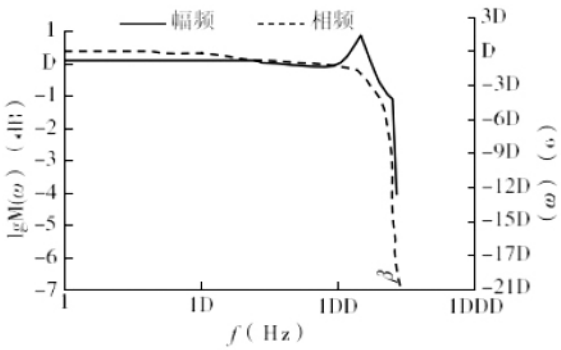



图 8 2D 数字伺服阀电－机械转换器的频率特性

## 3. 2D 数字伺服阀的数字控制技术的研究

**（1）滞环颤振补偿技术。**

在 2D 数字伺服阀中，步进电动机作为电－机械转换器通过齿轮传动机构驱动阀芯运动。理想条件下，齿轮传动机构输出与输入之间的关系不是单值的线性关系，而是表现出滞环非线性特性。由于滞环会对系统性能产生不利的影响，在此采用颤振补偿技术来抑制或消除滞环对系统的影响。图 9 是采用颤振补偿后的 2D 数字伺服阀的输入－输出曲线。从图 9 可以看出，未采用颤振补偿技术的 2D 数字伺服阀的滞环约为 2.2%；采用了颤振补偿技术后，对应叠加信号幅值为间隙量的 25%、50%、100% 时，滞环宽度分别约为 1.7%、1.1%、0.5%。图 9 表明采用颤振补偿技术可以有效地削弱或消除 2D 数字伺服阀的滞环。

**（2）死区的颤振补偿和流量规划。**

死区是电液伺服阀的一种常见非线性，多见于负开口阀，会对系统性能产生非常不利的影响，严重时甚至导致系统不稳定。长期以来人们一直在对电液伺服阀及电液系统的死区补偿进行研究。空载流量特性死区颤振补偿技术就是一种简单实用、行之有效的数字补偿技术。

图 10 是死区的颤振补偿原理图，其思想是：在阀芯的轴向位移上叠加一高频颤振周期信号（如高频正弦颤振信号），该高频颤振信号引起阀芯作轴向高频颤振运动，以阀在一个颤振周期内的平均流量作为阀在此阀口下的流量。此原理类似与高速开关阀的工作原理。

图 11 为所测得的颤振补偿后的空载流量特性曲线。图 11（a）是在未采 用颤振补偿技术下得到的空载流量特性曲线，死区约为 3.8%。图 11 是采用颤振补偿技术所测得的空载流量特性曲线，所对应颤振补偿信号幅值分别为死区量的 50%、100%、480%。空载流量特性曲线的死区分别减少到 2% 和 4%；当颤振补偿信号幅值为死区量 480% 时，空载流量特性曲线的死区没有了。这说明，采用颤振补偿技术可以减小或消除死区，并且随着颤振幅值的增加，死区变小。

采用颤振补偿虽然可以消除或减少空载流量特性的死区，但是空载流量特性的线性度 改善却并不太显著。为提高空载流量特性的线性度、获得线性流量增益，可以采用流量特性的线性规划，其设计思想是：首先，在实际测得空载流量特性的基础上，将空载流量和输入信号归一化后

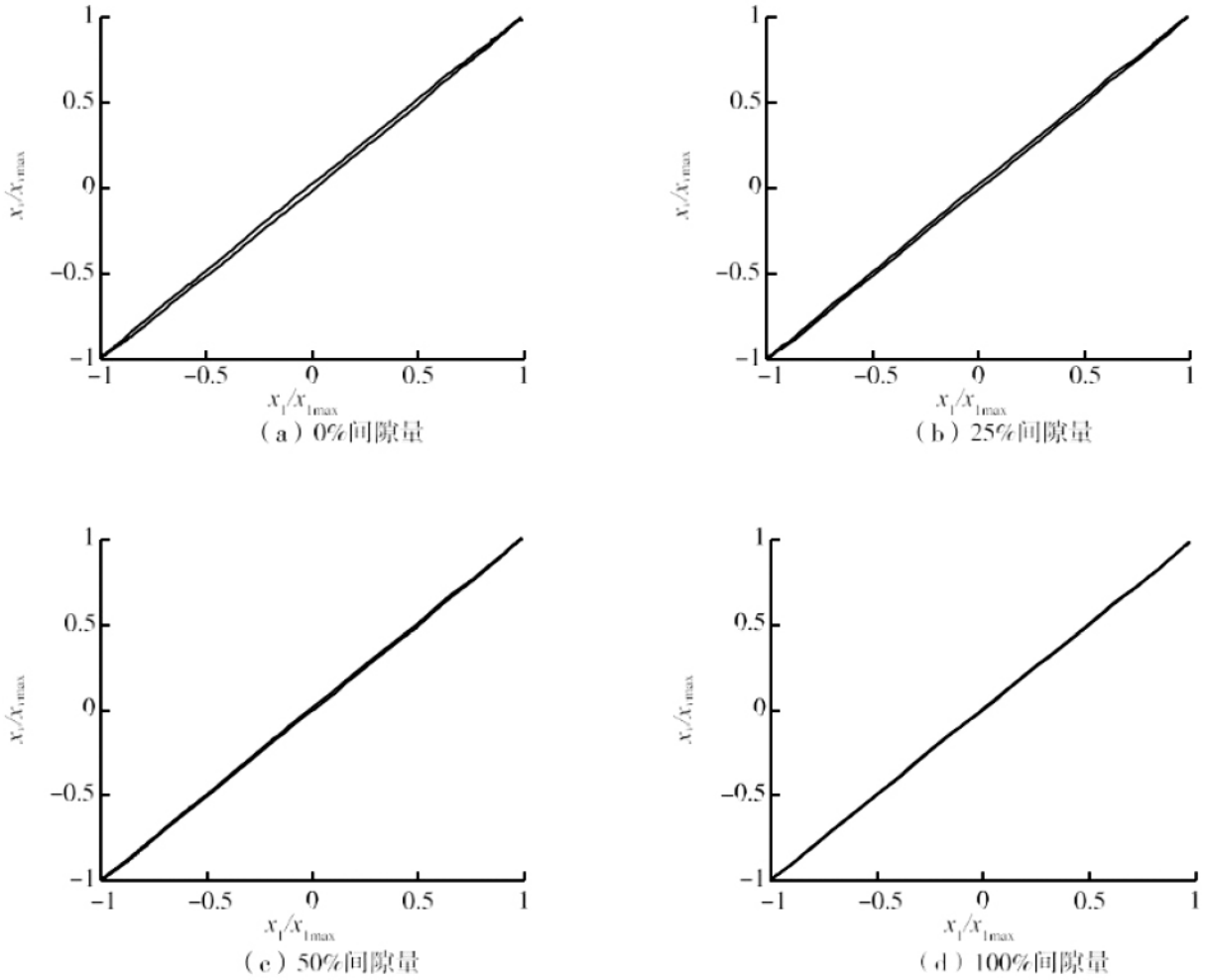



图 9 采用颤振补偿技术后 2D 数字伺服阀的输入－输出曲线

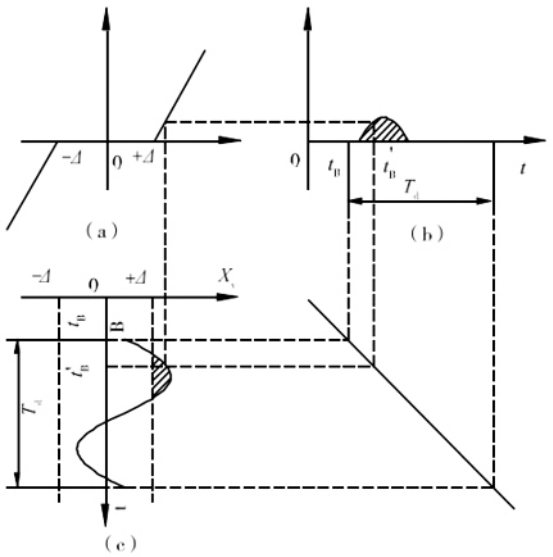



图 10 死区颤振补偿原理图

建立空载流量和输入信号的关系表格；然后，将所需要的空载流量归一化后查表，并经线性插值得到所需要的归一化后的输入控制信号；再将得到的归一化的输入控制信号转化为实际的输入控制信号；这样，由实际的输入控制信号控制阀芯位移，得到所需要的流量，从而使空载流量特性线性化。空载流量和输入信号归一化的目的是使所建立的表格和 系统压力无关，适用于不同的系统压力。空载流量的线性规划必须建立在颤振补偿消除死区的基础上，因为此时空载流量和阀芯位移是单值函数，对应某一流量只有唯一的阀

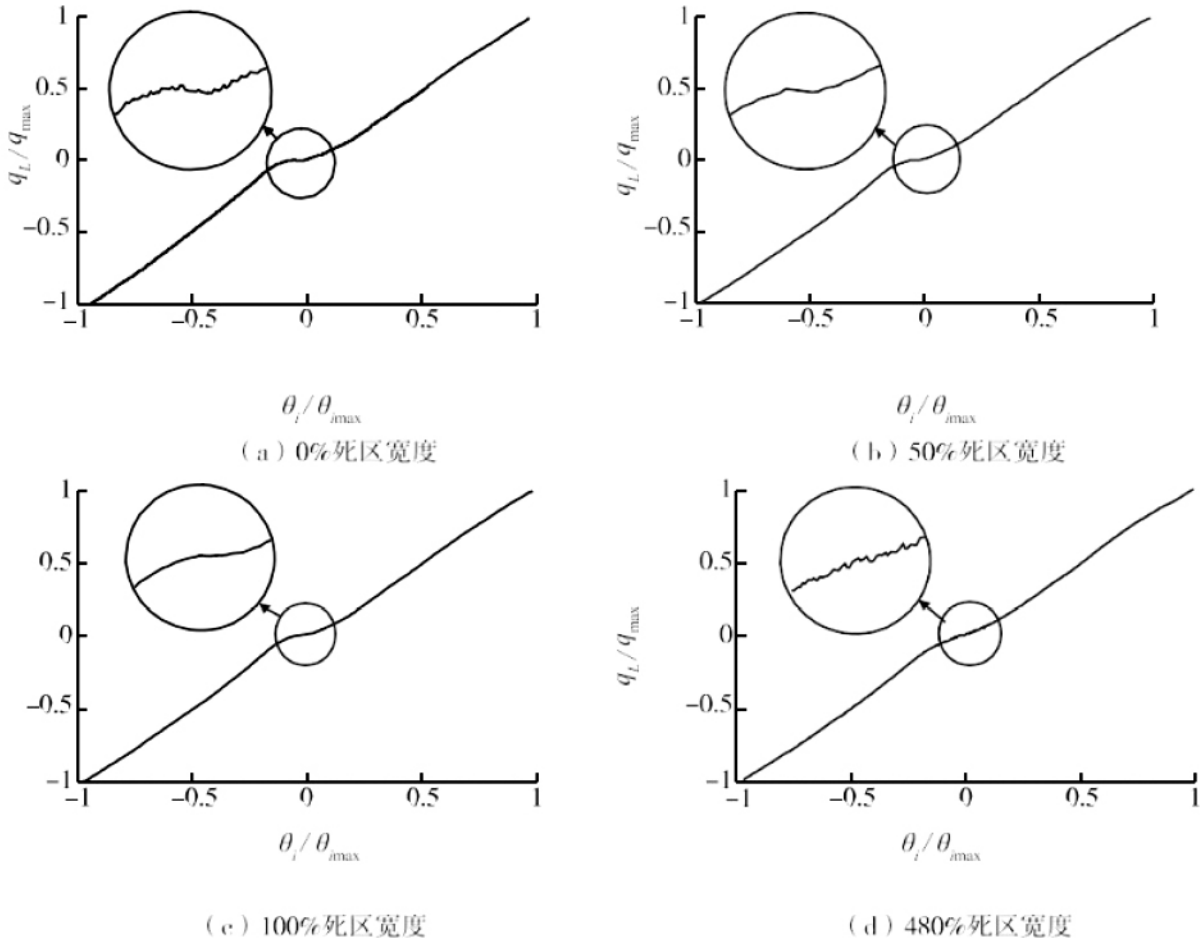



图 11　空载流量的颤振补偿

芯位移与 其对应。否则，即使流量特性线性化了，但是死区仍然还是存在。图 12 是采用流量特性线 性规划后实际所测得的空载流量特性。由图 12（a）可见，采用流量线性规划前空载流量特性的线性度约为 4.09%，而线性规划后在系统压力为 20 MPa 时空载流量特性的线性度约为 0.45%，很显然，流量线性规划后空载流量特性的线性度明显地得到了提高。由图 12（b）可知，在系统压力为 10 MPa 时，空载流量特性曲线的线性度约为 0.56%，和图 12（a）相比，空载流量特性的线性度没有明显的变化，这表明流量线性规划并且不受系统压力的影响。图 12 也表明，采用数字控制可以提高阀本身的性能。空载流量的数字颤振补偿和流量规划是通过数字补偿技术来消除 2D 数字伺服阀的死区。 与传统的配磨工艺相比，其并不是通过实际的磨削来消除或减少死区的，因此，其可以看成是一种“软”配磨。可见，采用空载流量的数字颤振补偿和流量规划不仅可以消除死区，获得线性流量增益，提高 2D 数字阀本身的静态特性；同时，还降低了伺服阀对加工工艺的要求，提高了生产效率和产品率，降低了生产成本。

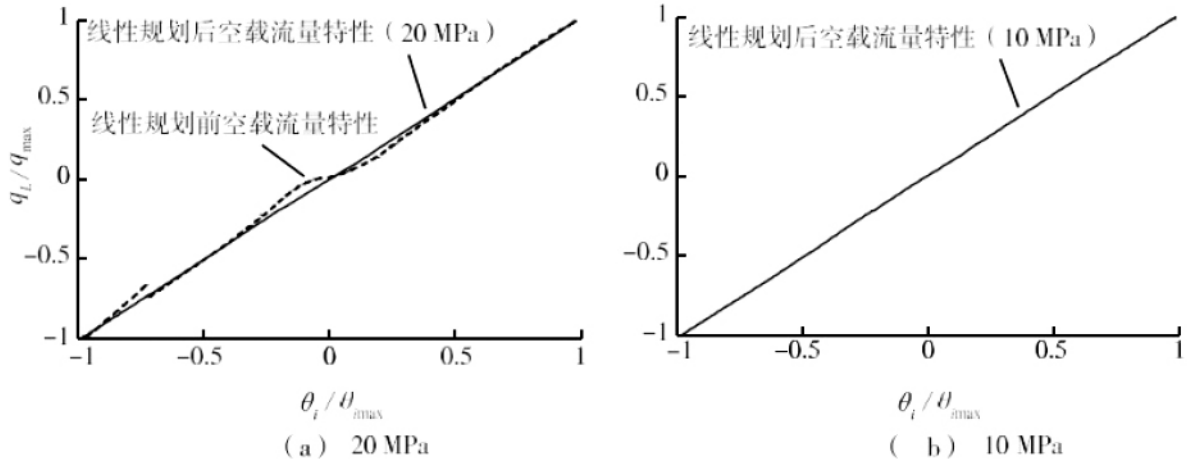



图 12 流量线性规划后的 2D 数字伺服阀的空载流量特性

## 三、结论

（1）2D 数字伺服阀独特的结构使得 2D 数字伺服阀的结构简单、体积小、重量轻、抗污染能力强，具有双冗余度。

（2）2D 数字伺服阀本质是两级位置反馈的液压流量伺服阀，其固有频率由阀芯质量和敏感腔的体积所决定，由于敏感腔可以设计得很小，基本没有死容腔，2D 数字伺服阀液压固有 频率非常高，到达 10000 ～ 100000 Hz。此外，2D 数字伺服阀以步进电动机作为电—机械转换器，普通型的步进电动机固有频率是 200 ～ 400 Hz，低惯量步进电动机其固有频率则会更高。因此，2D 数字伺服阀具有较快的响应速度。

（3）2D 数字伺服阀采用闭环同步跟踪控制算法控制，不仅使其电—机械转换器输出角位移能够无失步地快速精确地跟随输入控制信号的运动，而且也拓宽了其频宽。同时，采用数字控制技术，不仅改善了阀本身的动静态性能，如减小或消除了滞环和死区等非线性的影响，而且，也降低了对加工工艺的要求，提高了生产效率，降低生产成本。如果融入故障诊断、现场总线等技术，将进一步完善阀和液压伺服系统的功能，提高系统整体性能和管理水平。

（文章来源：《“数控一代”案例集（流体传动与控制卷）》，中国机械工程学会、流体传动与控制分会编著，中国科学技术出版社，2016 年 6 月）

# 工程机械用多路阀数字化技术

## ——山河智能装备股份有限公司

在多路阀开发过程中应用数字化技术，将使产品开发周期大大缩短；同时，通过与数字化技术融合，多路阀具备了智能化的特征，在节能与高效方面表现优异。山河智能装备股份有限公司在中挖阀的研制过程中，建立了标杆研究数据库，应用数字仿真技术，对液压系统、阀内流场、受力变形等状态进行研究，并借助CAM和CAT技术，完成制造和试验。产品通过与控制器集成，搭载在主机上完成装机试验和工业性试验。

### 一、导言

工程机械多路阀是液压系统的核心控制部件，由于近年来从行业直至国家都存在重主机、轻配套，重成果、轻基础的问题，长期以来，我国工程机械多路阀一直依靠进口，工程机械多路阀技术一直掌握在国外少数跨国企业手里，这些企业依靠市场垄断地位，制定“霸王条款”，产品不但价格高、交货期长，而且销售至我国市场上的经常是国外已经淘汰的产品。为突破这一限制我国工程机械行业发展的瓶颈，自主开发工程机械多路阀迫在眉睫。

山河智能装备股份有限公司产品历来以自主创新的风格享誉业内，从涉足液压元件领域开始，摒弃传统的测绘仿制等开发模式，坚持自主创新，依托集团公司多年主机开发优势，致力于开发具有核心专利技术的专用液压元件产品。液压元件项目立项之初，公司董事长何清华教授就敏锐地指出：突破设计门槛和制造门槛是解决液压元件瓶颈的关键。在这个思想的指导下，我们重点建设两个平台，进行突破。一是基础研究设计平台，该平台依托山河智能产学研一体化的优势，联合高等院校、科研院所，利用现代数字化仿真技术开展工程机械液压系统机液耦合、液压阀流量分配特性、阀口控制特性的研究，包括应力、流场、液压脉动、液压冲击、材料配对等方向，逐渐突破并掌握流体传动的核心技术，为开发高端液压多路阀提供理论基础。二是制造平台，多路阀产品内部流道错综复杂，精密 铸造技术成为液压

件产业化实施的第一大难题，同样液压零部件产品对加工精度要求几近苛刻，这两大难题构成了液压元件开发的制造门槛；山河智能制造平台依托已经良好运行的无锡液压元件制造基地，并在此基础上，引进先进的数字立式、卧式加工中心和数字化台架试验检测设备，逐步实现制造门槛的突破。

## 二、电液控制多路阀组的数字化研制

### 1. 电液控制多路阀组的数字化 CAD 设计

工程机械用多路阀组的数字化 CAD 设计技术路线如下：通过对电液控制系统进行调研与分析（包括客户需求分析、对手调查、功能对比分析、性能对比分析、质量分析、国内外市场供应需求现状与预测分析），并通过数据查询系统查阅现有的产品技术发展和专利，建立电液控制多路阀组数据库，在此基础上，构思创新的液压回路，并利用现代计算机仿真技术，对电液控制多路阀组的液压系统和阀体结构进行建模与仿真，研究工作阀口的流量分配与压力损失、流场分布、阀体变形情况、阀芯阀体耐久性情况，在完成回路和结构设计的优化后，应用数字化三维设计和二维设计软件，完成电液控制多路阀组的数字化 CAD 设计。

（1）建立电液控制多路阀组数据库。

综合已有的文献、专利和图纸资料对力士乐（博世力士乐液压及自动化有限公司）、KYB（萱场工业株式会社）、KPM（川崎重工业株式会社）、东芝（东芝机械株式会社）等数十家国外标杆企业的工程机械多路阀产品进行了原理与结构研究，并从单动作、复合动作、直线行走、结构特点等不同方面进行归类类比，同时，对 KYB 和

| | | | GAT320B | GAT320C | GAT320D | EX200-1 | EX200-2 | EX200-3 | ZX200 | ZX200-3 | 270XB | PC200-1 | PC200-3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阀芯数量 | | | | | | 9 | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 阀芯直径 | | | | | | | | | | | 28 | | |
| 特点 | 阀芯行程 | | | | | | | | | | 10 | | |
| | 负流量控制 | | Y | Y | Y | Y | LS | LS | 正 | 正 | Y | Y | Y |
| | 直线行走 | | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | N | Y |
| | 动臂合流 | | Y | Y(阀外管路合流) | Y(阀外管路合流) | Y | Y | Y | Y | Y | Y（阀后合流） | Y | Y |
| | 斗杆合流 | | y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y（阀前合流） | Y | Y |
| | 铲斗合流 | | | N | N | N | Y | Y | N | N | N | N | N |
| | 斗杆回油再生 | 方式 | N | 再生单向阀在阀芯外 先导控制 | 再生单向阀在阀芯外 先导控制 | N | 阀芯外再生 | 阀芯外再生 | 阀芯外再生 | 阀芯外再生 | 阀芯内 | N | N |
| | | 再生率 | | | | | | | | | | | |
| | 斗杆再生切断 | 外部控制 | N | N | N | N | N | N | Y | Y | Y | N | N |
| | | 自动切断 | N | Y | Y | N | Y | Y | Y | Y | Y | N | N |
| | 动臂再生 | | N | Y（阀芯外） | Y（阀芯外） | N | N | N | 阀内再生 | 阀内再生 | Y（阀芯内） | N | N |
| | 动臂保持阀 | | Y | Y | Y | N | Y | Y | Y | Y | Y | Y（防爆阀） | N |
| | 斗杆保持阀 | | Y | Y | Y | N | Y | Y | Y | Y | Y | N | N |
| | 动臂优先 | | N | N | N | N | N | N | 仅铲斗、斗杆流量限制 | Y | Y | N | N |
| | 回转优先 | | N | N | N | N | N | N | | Y | Y | N | Y |
| | 斗杆优先 | | N | Y（arm1外控 arm2固定） | Y（arm1外控 arm2固定） | N | N | N | | Y | Y | N | N |
| | 内置信号油路 | | Y | N（堵阀块） | N（堵阀块） | N? | N | N | N | N | Y | N | N |
| | 扩展备用油口 | | N | n | n（多一个备用阀芯外部合流） | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y |

图 1 中挖多路阀对比分析库

KPM 的典型代表产品进行了实体解剖，进行标杆实物研究。通过完成上述工作，团队借助计算机数字平台，建立了较为完整的国外标杆工程机械多路阀组产品数据库（图 1），作为多路阀组回路设计和结构设计的参考。

（2）建立电液系统仿真平台。

通过研究挖掘机的能量传递规律，搭建挖掘机机—液系统联合仿真模型，并与各单动作和复合动作的实测数据对比，修正系统的仿真误差，完成仿真平台建设。在此虚拟环境下，进行挖掘机的不同工况模拟，研究液压系统流量分配和压力特性，考察机器的工作速度和稳定性等特征，为优化液压系统设计提供理论依据。

（3）多路阀组回路设计和原理性试验。

通过对比研究、理论分析和长期以来对于多路阀组的应用经验总结，团队创新性地构思了正、负流量系统共用，主油路和先导油路分离的多路阀方案，并设计了斗杆内收全再生和动臂下放主

表 1 发动机 2150r/min 斗杆全再生试验参数表

| 2150- 斗杆全再生测试 | | | | | | | | | | | | | 状态说明 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 主泵 1 | 主泵 2 | 小腔 | 大腔 | 小腔再生育 | 小腔 | 大腔 | 回油 | 主泵 | 主泵理论 | 再生比例 | 工作时间 | 测试姿态：动臂举升到前叉水平，动作：斗杆内收和外摆到最大 |
| 曲线编号 | $p_1$-bar | $p_2$-bar | $p_3$-bar | $p_4$-bar | $p_5$-bar | $q_r$-L/min | $q_b$-L/min | $q_t$-L/min | $q_p$-L/min | $q_p^n$-L/min | | $t$（a） | |
| 阀芯内再生曲线 | | | 220 | 85 | | | | | | | | 3.00 | 原始状态曲线 |
| | 135 | 135 | 220 | 90 | | | | | | | 約 0.3 | 3.00 | 原始状态曲线 |
| 77# | 192 | 192 | 296 | 161 | 213 | 263.81 | 538.61 | 0 | 274.80 | 352.86 | 0.96 | 2.91 | 阀外全再生最初曲线，全再生 - 没有回油 |
| 80# | 197 | 197 | 270 | 155 | 220 | 271.01 | 553.31 | 0 | 282.30 | 334.29 | 0.96 | 3.06 | 小腔再生侧阀芯加大 3mm，全再生 |
| 79# | 197 | 197 | 261 | 155 | 217 | 246.74 | 503.77 | 0 | 257.02 | 334.29 | 0.96 | 3.04 | 小腔再生阀芯加大 3mm，全再生 |
| 83# | 200 | 200 | 265 | 152 | 215 | 278.45 | 568.51 | 0 | 290.05 | 334.29 | 0.96 | 2.84 | 斗杆 1 小腔再生侧加大 3mm" 大腔进油侧阀芯加大 6mm，全再生 |
| 85# | 185 | 185 | 263 | 158 | 212 | 295.99 | 604.30 | 0 | 308.32 | 371.43 | 0.96 | 2.73 | 斗杆 1 小腔再生侧加大 3mm" 大腔进油侧阀芯加大 6mm" 斗杆 2 阀芯 5mm，全再生 |
| 改善措施 | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | — | — | 0 | ↓ | ↓ | 1.00 | （2.3-2.5） | 针对曲线 85# 全再生来看 |
| 说明 | 1. 从压力表现来看，由于试验方案中的换管变径和过流面积不是最合理状态，所以若要用全再生方案，则需要保证在再生管路的压损最小，在阀体设计中使过流面积尽量大。从而使主泵、小腔和大腔压力整体下降，使主泵工作在变量点以下；<br>2. 需要加大阀芯全开口的进流面积，使其从主泵到大腔还会由于再生量大而增加过大的压力损失，同样使小腔回油再生在阀芯处的压损尽量低，从而间接地降低主泵的压力；<br>3. 从流量来看，全再生时主泵需求流量可以不用达到最大排量，可以通过其他途径降低主泵的输出流量，这样可以防止由于流量过大使整个工作压力上升 | | | | | | | | | | | | |
| 91# | 115 | 115 | 139 | 77 | 100 | 256.28 | 523.25 | 165.17 | 432.14 | 432.14 | 0.21 | 2.9 | 小腔部分回油，弹簧伸出长度 12.0mm |
| 改善措施 | ↑ | ↑ | ↓ | — | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | — | — | ↑ | （2.3-2.5） | 针对曲线 95# 部分回油来看 |
| 说明 | 1. 从压力表现来看，主泵的工作压力低于变量点，主泵排量达到了最大，然而再生比例过小，只有 0.21，可以在保证最大排量的情况下，使其工作压力逼近变量点。同时尽最大可能降低管路中和阀芯处的压力损失，减小回油孔的有效过流半径，从而实现 0.5 ~ 0.7 左右的再生比例，工作时间在 2.3 ~ 2.5s 左右 | | | | | | | | | | | | |

泵不供油的新型液压回路方案，为验证上述方案的可行性，设计了原理性试验方案在现有批量生产的中型液压挖掘机上进行了原理性试验，其中，斗杆内收全再生试验回路和参数如图 2 所示，试验数据见表 1。试验结果表明，所构思的方案切实可行，并且系统节能高效，效果明显，由此形成了具有自主知识产权的中型液压挖掘机新型液压回路。

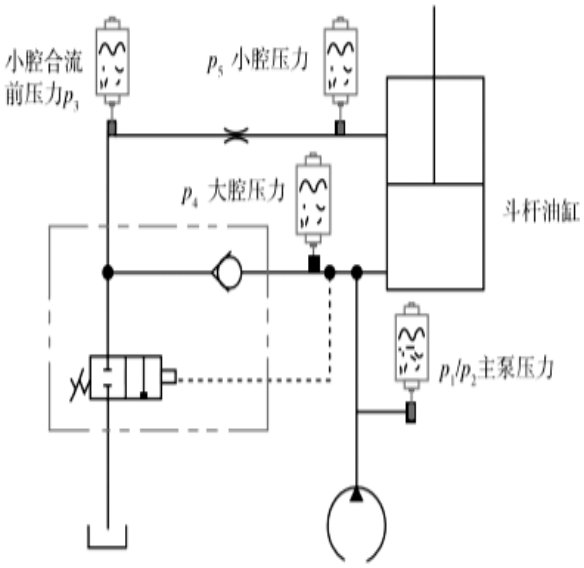



图 2 斗杆内收全再生测试回路

（4）电液控制多路阀组的数字化结构设计。

在电液控制多路阀组液压回路得到确定的基础上，开展多路阀组的数字化 3D 结构设计。多路阀组结构设计分为主油路部分设计和先导油路部分设计。主油路部分结构设计采用整体式铸造成型方案，根据该方案所铸造的多路阀组具有：主阀体积小，压力损失小，加工经济性好等优点，但是其阀内内部流道结构错综复杂，且结构设计与现有铸造工艺技术、加工工艺技术密切相关，如何解决该问题成了难题。一方面，通过采用计算机仿真技术，进行虚拟装配，并结合多路阀内部流场分析，优化阀体内部流道和受力情况，如图 3 所示；另一方面，通过数字化阀口面积计算平台，合理开设阀芯节流口，有效降低内部流通阻力，并提高复合动作协调性，如图 4 所示。

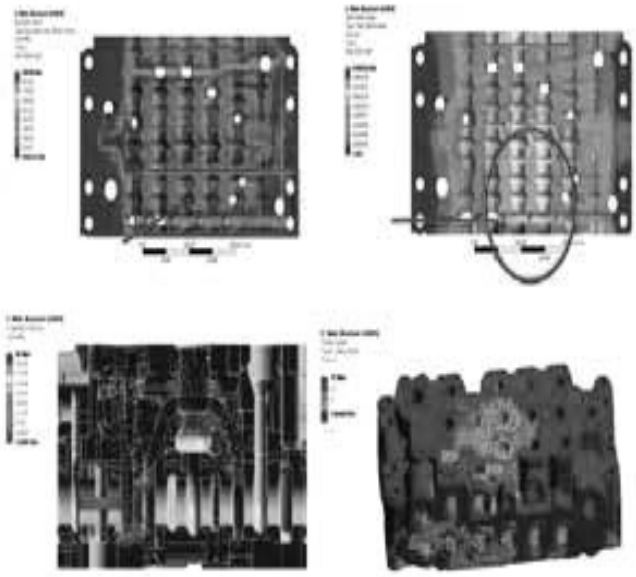


图 3 阀体的应力应变、压力场和疲劳强度分析

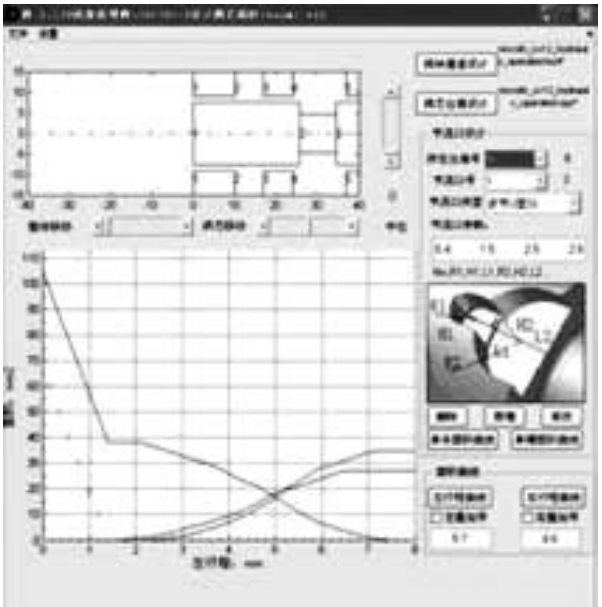


图 4 数字化阀口面积计算平台

经过数轮优化设计，完成了多路阀组的结构

设计，如图 5 所示，该中型液压挖掘机多路阀组结构上具有以下特点：

（1）主油路和先导油路为独立结构，可按使用要求，形成正流量控制系统或者负流量控制系统，增强了多路阀的通用性。

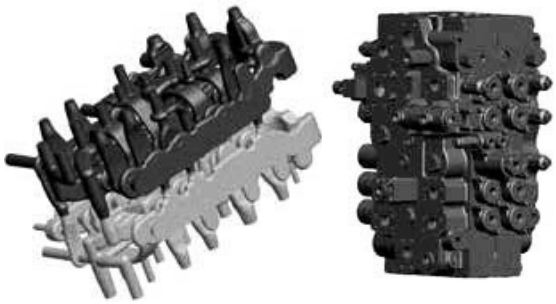


图 5 多路阀组内部流道图和三维结构图

（2）多路阀安装形式具有直立安装和倒立安装两种方式，更加方便主阀在机器上的管路布置。

（3）斗杆内收再生和动臂下降再生为阀体再生结构，相比传统的阀芯内再生，具有流通面积更大、节能效果更好的特点。

（4）多路阀各阀联布置按照工作负载大小布置，即负载越大越靠近多路阀进油口，使得复合动作时，为保证动作协调而产生的压力降低，从而节能效果更好。

**2. 多路阀组的数字化 CAM 制造**

多路阀组的试制车间位于山河智能的无锡分公司，该公司为专业的液压阀生产制造公司，拥有完善的铸造生产线、加工中心生产线、无尘装配车间等高精密液压元件生产线，具备多年液压阀片的生产加工经验，是赫斯可液压有限公司（HUSCO）等国外知名液压企业的战略合作供应商。电液控制多路阀组的试制分为以下阶段进行。

（1）阀体开模与铸造。

整体式多路阀组开发在国内尚属首次，为保证项目的成功实施，在模具开发之前，项目组创新性地引进了数字化 3D 打印技术进行泥芯的制作，以此对多路阀浇注方案的可行性进行验证，如图 6 所示。数字化 3D 打印技术辅助完成的浇注毛坯，为多路阀批量生产的模具开发奠定了基础，在此前提下，通过与模具供应商合作，开发完成了多路阀组模具。

图 6 3D 打印泥芯和铸造流道组装图

（2）多路阀阀体等零件的数控加工。

利用公司已有的机加工工艺基础，并通过引进卧式数控加工中心和珩磨机，确立了多路阀组主阀体的加工工艺路线，完成阀体和各零部件的加工。

珩磨是阀芯孔的最终精加工工序，其加工精度决定主阀的加工质量，珩磨刀的长度设定很关键，较长的珩磨刀有修复直线度的机能，加工时珩磨刀接触点是核心，如果出现接触点位置不对，孔径就会偏差，锥度以及圆度也会超差。引进的高精密数控珩磨机，保证了阀芯孔尺寸的一致性（图 7）。

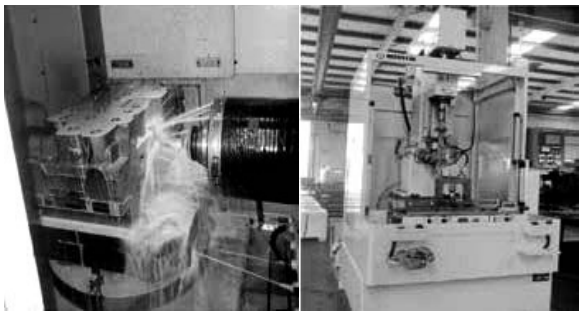


图 7 数控卧式加工中心和珩磨机加工多路阀组阀体现场

### 3. 多路阀组的数字化 CAT 测试

样机试制完成后，由公司品质管理部门牵头，联合各协同攻关单位的项目负责人员，依据相关技术标准对样机进行了台架试验、装机试验和工业性试验。

（1）电液控制多路阀组台架测试。

台架试验主要测试多路阀组的功能和性能，测试项目包括气密性试验、耐压试验、回路功能试验、内泄漏试验、压力损失试验、优先阀测试、保持阀压力测试、梭阀组功能试验 等。采用 CAT 系统进行数据采集，CAT 系统可同时进行三路加载试验，可对挖掘机复杂的复合动作流量、压力进行数据采集（图 8）。

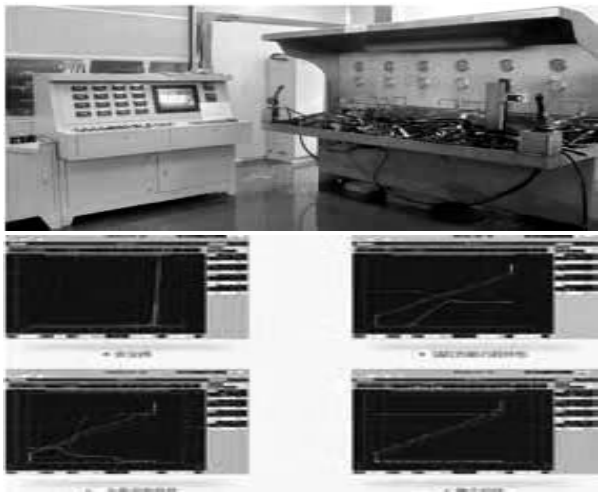


图 8 多路阀组 CAT 试验台及测试曲线

（2）多路阀组耐久性台架试验。

为考核所开发的多路阀组的可靠性，分别进行阀体的 800 万次脉冲试验，和整阀的 100 万次换向耐久性试验。脉冲试验台在设计时通过搭建仿真模型，进行试验台的选型设计。经过耐久性试验后的主阀功能和性能正常。

（3）多路阀组装机测试。

多路阀组装机后，通过与自主开发的控制器进行集成，构成整机的电液控制系统。通过现场调试阀芯和控制软件，实现机器的智能化控制。通过与搭载国外先进电液系统的现有量产机和国际一流品牌的挖掘机产品进行各项性能对比测试（图 9）。

图 9 多路阀组装机试验

（4）工业性试验。

完成装机试验的多路阀组，进行 2000 h 工业性试验，试验结果记录如表 2，通过工业性试验表明，搭载自主研制的工程机械多路阀可靠性高，完全满足挖掘机使用要求。

## 三、主要成果

（1）突破了限制我国液压元件发展的设计

门槛和制造门槛，开发了具有自主知识产权的电液工程机械多路阀，并通过总体集成技术，使产品作业效率、油耗、排放指标明显优于国内外主流产品，为掌握基础元件核心技术、振兴民族装备制造业，做出了贡献。

（2）申报专利34项，其中发明专利18项、授权3项；参与制订了3项液压元件领域的国家标准；在国内外核心刊物上发表学术论文24篇；培养了博士生1名、硕士生5名、博士后出站1名，极大地提升了项目团队科技创新能力。

## 四、经济性、节能、环保性分析

在中挖阀的开发过程中，通过引入数字化技术，大大缩短了产品开发的周期，将为产品迅速占领市场起到重要作用，其产生的间接经济效益难以估量。通过数字化仿真技术，使得开发的产品在理论上得到了保障，大大减少了仅依靠多次试验摸索来进行开发的费用；3D打印技术的应用，减小了模具开发的风险，节省了重复进行模具开发费用的投入达数百万元；CAM和CAT技术的应用，既大幅提高了生产效率，又节约了大量人工成本。

应用数字化技术开发的多路阀产品经过第三方权威机构检测，作业效率和油耗明显优 于国内外同类产品，节能效果显著，市场推广的预期经济效益相当可观。以2015年的行业 数

表2 工业性试验结果记录表

| 序号 | 项目 | 规定要求 | 检验结果 |
|---|---|---|---|
| 1 | 总作业时间（$T_0$）/ h | ≥ 2000 | 2107 |
| 2 | 总排除故障时间（$T_1$）/ h | / | 6 |
| 3 | 总维护保养时间（$T_2$）/ h | / | 16 |
| 4 | 总土方量（$V$）/ $m^3$ | / | 418732 |
| 5 | 总消耗燃油量（$Q$）/ L | / | 21730 |
| 6 | 平均当量无故障时间（MTBF）/ h | ≥ 200 | 646.2 |
| 7 | 平均生产率（$E$）/ $m^3/h$ | / | 498.5 |
| 8 | 燃油消耗量（$M$）/ $mL/m^3$ | / | 51.8 |
| 9 | 致命故障次数 | 0 | 0 |
| 10 | 可靠度 / % | ≥ 80% | 97% |

据为例，2015 年全年挖掘机销量约 50000 台，按 20 ～ 36t 型挖掘机占比 40% 计算，销量约为 20000 台，本产品与进口产品相比，每台约节约采购成本 1 万元，按照未来市场竞争中，本产品占市场份额的 15% 计算，成本节约产生的直接经济效益达 3000 万元。此外，该产品对比同类产品作业速度提高 10% 以上，油耗降低 26% 以上，按 20t 级挖掘机计算中、大型挖掘机，取正常挖掘作业的平均油耗为 23 L/h，每天的工作时间为 8h，每年的工作日为 200 天，则采用本产品的挖掘机，油耗与同类型传统液压挖掘机相比降低 26% 以上，一 台挖掘机一年节省燃油约为9568 L，一年累计减少的排放污染物将大大降低，以燃油每升单价 5 元，本产品占市场份额的 15% 计算，所取得的直接经济效益预计约为 1.44 亿元。作业效率的提升，节省的人工费用和工期也将非常可观。综上，所取得的直接和间接经济效 益预计约达 2 亿元。

## 五、展望

工程机械用多路阀数字化技术在国内还处于起步阶段，随着研究的深入和技术的进步，开发工程机械用多路阀将更加广泛地应用数字化技术，进一步提升产品性能，缩短开发周期，与此同时，多路阀技术与数字化技术将更好地融合在一起，大幅提升机器的智能化水平，引领工程机械向着绿色、高效的目标发展。

（文章来源：《“数控一代”案例集（流体传动与控制卷）》，中国机械工程学会、流体传动与控制分会编著，中国科学技术出版社，2016 年 6 月）