

工业计量对制造业升级的影响*

——基于质量、成本与技术创新三维度的考察

邵婧婷¹ 黄群慧² 李芳芳³

(1. 中国社会科学院工业经济研究所, 北京 100006;

2. 中国社会科学院经济研究所, 北京 100836;

3. 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083)



内容提要:计量是工业“四基”中重要产业技术基础设施的五要素之一,工业计量是从经济学视野审视工业基础能力对产业升级重要性的核心切入点。本文创新性地构建了工业计量对制造业升级影响的理论框架,并采用实证方法与诠释主义相结合的分析方法对其进行现实检验。研究表明:在微观层面,工业计量可以通过产品质量的提升、生产成本的降低正向影响企业的经济效益。同时,工业计量也可直接影响企业的技术创新,且企业的技术创新又会通过影响产品质量和生产成本,进一步对企业经济效益产生影响,促使制造业向高附加值、高综合效率升级。在宏观层面,工业计量可以引领制造业行业的技术进步,并对微观层面企业的计量活动产生正反馈效应,形成工业计量对制造业升级多重、循环的影响机制。随后本文选取工业计量领域具有典型代表性的两家企事业单位进行案例分析,进一步验证了工业计量对制造业升级的作用,形成了对定量研究结果的质性检验与证据补充。本文的研究为揭示工业计量推动制造业升级的作用机理提供了经济学理论依据,并为更好地实现产业基础能力提升进而促进现代化产业体系构建提供了相关启示。

关键词:工业计量 制造业升级 产品质量 生产成本 技术创新

中图分类号:F423 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2024)11—0089—19

一、引言

建设现代化经济体系是实现中国式现代化的重要基础,也是加快构建新发展格局,推动高质量发展的核心,而创新引领、协同发展的产业体系是现代化经济体系的首要子系统(黄群慧, 2020)^[1]。伴随着改革开放以来快速的工业化进程,我国逐步形成了门类齐全、独立完整的现代产业体系,但制造业部分核心环节和关键技术受制于人,产业基础能力不足(中国社会科学院工业经济研究所课题组, 2021)^[2]。产业基础能力决定了产业发展的高度,也决定了企业在全价值链分工中获取高附加值地位和治理权力的能力(黄群慧和倪红福, 2020)^[3],是在新发展阶段现代产业体

收稿日期:2023-02-24

* **基金项目:**中国社会科学院学科建设“登峰战略”资助计划(DF2023YS25);中国社会科学院工业经济研究所创新工程项目“新时代中国企业创新与成长国际化研究”(2022GJS04);中国社会科学院工业经济研究所研究阐释习近平经济思想项目“‘一带一路’引领新发展格局构建的理论逻辑、战略重点与实践路径”(GJSZY2024006)。

作者简介:邵婧婷,女,助理研究员,管理学博士,研究领域为企业管理,电子邮箱:jingttingshao@126.com;黄群慧,男,研究员,博士生导师,研究领域为企业管理、产业经济,电子邮箱:huang.q.h@263.net;李芳芳,女,副教授,硕士生导师,经济学博士,研究方向为产业经济、国际贸易与投资,电子邮箱:liff0602@163.com。通讯作者:李芳芳。

系构建过程中走出“结构性陷阱”的核心和基础(芮明杰,2018)^[4]。中国工程院工业强基战略研究项目组(2017)^[5]将工业基础界定为“制约我国工业发展、受国外限制和具有前瞻性的核心基础零部件(元器件)、关键基础材料、先进基础工艺和重要产业技术基础”(简称工业“四基”)。其中,计量、标准、检验检测、认证、认可是重要产业技术基础设施的五个要素,而工业计量作为计量的重要组成部分,是从经济学视野审视工业基础能力对产业升级重要性的核心切入点,也是制造业强国战略实施过程中工业基础能力提升的重要抓手。事实上,无论是新兴产业还是传统产业,都离不开工业计量活动(王舒卉等,2018)^[6]。工业计量贯穿于工业领域一系列技术性工作中,工业计量的能力往往是一个国家工业技术水平、企业竞争力的重要体现和组成部分(李少壮等,2015)^[7]。例如,在航空领域,由于我国自主攻克了高温高转速下叶尖间隙传感器校准等多项计量技术,困扰我国航空领域多年的“缺心”难题得以解决(刘琦楠等,2023)^[8]。Chirkov(2020)^[9]研究发现,与计量活动相关的价值增加值约占国民生产总值的3.5%,计量的成本价值(cost value)在工业产品成本价值总量中的占比约为5%。

近几年我国工业计量得到了长足发展,各类基础性、前沿性和共性科研成果不断涌现。《计量发展规划(2021—2035年)》的数据显示,截至2022年初,我国已建成185项国家计量基准和6.2万余项社会公用计量标准,获得国际承认的校准测量能力达1779项,位居世界前列,这为我国经济高质量发展奠定了计量基础。但在已有的国际主流计量测试技术及仪器设备中,我国原创技术还相对较少,很多高端、高附加值测量仪器设备仍主要依赖进口,这很大程度上限制了工业计量对制造业发展的创新引领作用。可以说,我国现有国家计量体系还远远不能满足经济高质量发展的要求。在新一轮技术革命深化拓展、全球价值链加速重塑的当下,工业计量作为各国质量基础设施建设要素的战略地位还将进一步提升,工业计量对制造业发展已不单单只起到支撑和保障作用,而逐步向引领产业发展转变。尤其是,随着计量发展进入量子化时代,以量子理论为基础的微观量子基准正逐步取代过去的宏观实物基准,新的测量技术会应运而生,谁能够在量子计量标准的研究上取得更早更多突破,谁就能掌握更多的规则制定权,也就更能赢得产业发展的战略先机,攀升至全球价值链的最高端。

在已有研究中,从经济学尤其是产业经济学视角审视工业计量对制造业升级重要性的文献非常少,其中针对工业计量与制造业关系的研究,大多只从微观制造业企业生产工艺角度入手,侧重于工业计量在工艺过程中的具体功能与作用。例如,有的学者研究了工业计量对产品质量(薛兴昌,2006^[10];Kocafe等,2015^[11])和技术创新(叶声华和秦树人,2009^[12];黄松涛,2018^[13])的保障作用;有的学者强调了工业计量在能耗度量、保障安全生产(Giacone和Manco,2012)^[14]和实现集约化生产(梁治中,2013^[15];尚晓丽和白鑫,2014^[16])中的作用。对于工业计量在中观甚至宏观层面推动产业升级方面的论述相对较少,且偏向于定性判断,如朱崇全和周迎春(2011)^[17]从产业管理角度论述工业计量的重要性;Filho和Goncalves(2015)^[18]讨论了工业计量在社会经济生态效率和国际贸易公平性中发挥的作用。Chirkov(2020)^[9]对计量在制造业各分领域成本价值占比进行了数量上的测算,如计量成本在工程建设领域成本价值中所占比例约为1%,在客车生产成本价值中占比为10%,在微电子产品生产成本价值中占比为25%~50%,在医疗领域成本价值中占比大于20%,在科学研究领域成本价值中占比大于40%(以美国的阿波罗太空计划为例)。可见,越是高精尖的制造业领域,工业计量的重要性越凸显,但该研究并没有阐明工业计量对制造业成本价值影响的理论机制。

鉴于此,本文从质量、成本与技术创新三个维度定义了制造业升级,进而从微观和宏观两个层面阐述了工业计量对制造业升级影响的理论机制,并对其进行实证检验。本文可能的边际贡献在于:(1)在理论层面上,本文的研究能够通过工业计量这一传统工学领域概念的经济价值探

讨,构建系统的工业计量影响制造业升级的经济学理论框架。(2)在研究方法上,由于工业计量的专业性和基础性,其经济学指标和数据很难直接获取,因此,较少有研究利用实证方法对工业计量在产业升级中的重要作用进行验证。本文通过问卷调查和案例研究等方法尽可能地收集实证数据,将实证主义与诠释主义研究范式相结合,使工业计量这一工学领域概念得以转化为可度量的经济学指标。

二、理论分析与研究假设

刘奕等(2017)^[19]提出了研究产业升级的两种视角,即产业间升级和产业内升级。本文所指的制造业升级是指在产业内升级视角下制造业企业通过工艺流程升级、产品升级、功能升级和跨价值链升级(Humphrey和Schmitz,2002)^[20]来获取更高附加值和更高效率,进而推动整体产业水平的提升和产业结构不断趋向高级化、合理化的过程。具体而言,在微观层面,制造业升级体现为制造业企业通过增加技术要素投入引发生产成本、产品质量、技术创新能力等方面的改变,进而使生产的产品更加优质、科技含量更高,生产更有效率(Giuliani等,2005)^[21],在经济学指标上最终表现为企业经济效益的提升;在宏观层面,制造业升级体现为由微观企业的生产效率、创新能力等方面的提升所引致的行业竞争格局的改变,即高技术产业部门的不断扩张和低技术产业部门的逐步萎缩(阳立高等,2018)^[22],以及由此带来的制造业整体的技术进步。

计量是为实现单位统一、保障量值准确可靠而进行的科技、法制和管理活动。在工业生产中,一方面,通过对测量仪器的校准或检定,将国家测量标准所规定的单位量值通过各级测量标准传递到工作测量仪器,以保证测量所得的量值准确一致(即量值传递);另一方面,通过规定不确定度的不间断比较链,使测量结果与计量基准联系起来,使不同的测量结果之间具有可比性(即量值溯源),工业领域的生产活动才具有可衡量的标准(陈建刚和朱崇全,2015)^[23]。这种衡量标准应用于测量投入过程中原材料的使用程度、能源消耗程度、生产工艺的技术水准等,以及产出过程中产品的品质与价值等,前者体现为生产成本、能源消耗、生产效率,后者体现为产品的质量。因此,为了实现升级,制造业企业会在生产流程中通过反复的量值传溯来获取更多的计量数据和信息,以寻求测量与检验结果的可靠、准确和可比,达到降低生产成本与能源消耗,提高生产效率和产品质量的目的。在先进制造业中,计量单位制量子化变革以及计量技术的升级导致更多的计量数据可以被监测到,获取的信息更加全面、实时、智能化,为生产过程的数智化转型提供了技术基础。从国家的角度来看,以工业计量活动为基础,每个工业企业产品质量的提升、生产成本与能耗的降低,带来的是制造业生产技术水平、整体国际竞争力等方面的提升,从而对该国经济发展、对外贸易、技术进步产生较大影响。因此,本研究主要从工业计量对微观层面工业企业产品质量、生产成本和技术创新的作用机制进行探索,并进一步在宏观层面阐述工业计量在制造业整体技术进步中发挥的作用。

1. 工业计量对产品质量的影响

产品质量是指产品所具有的某种用途或效用,满足社会不同需要所具备的性能与特性(Mitra,2016)^[24]。在日常生产、生活中,购买或使用某种产品,事先都要了解该产品的技术指标和性能。譬如,洗衣粉的去污性、破乳剂的破乳性、渗透剂的渗透性、彩电的清晰度等。这些性能和指标对应一定的计量标准,高标准意味着产品的质量就越高。而工业计量则通过计量器具的检定、校准,以及工业活动中的量值传溯和计量管理,使得产品达到一定的性能和标准。产品生产从原材料进厂、各种生产工艺与工序,最后到成品,这中间往往要历经多个环节,每个环节都与产品的质量息息相关,而每个环节也都需要工业计量参与其中。

在各个生产环节,工业计量提升产品质量的作用主要体现在:首先,工业计量可以减少原材料质量特性值的误差范围。产品质量的提升与原材料有很大关系,一方面,原材料的高质量是产品

质量提高的基础;另一方面,原材料不同的特性会应用到不同的产品生产中,若是不加区分也会影响产品的质量。例如,纺织品生产的主要原材料是棉花,而不同原棉的性质指标和纺纱性能也不同,根据原棉本身的质量及按照原棉的品种和性能来合理配棉,才能满足不同品种纱线的质量要求,进而才能生产出满足要求的纺织品。其次,工业计量可以减少产品质量特性值的误差范围。产品质量特性值就是反映产品性能的若干个特征参数或技术指标,工业计量通过量值溯源和计量管理来保证各种参数或指标的准确性、可靠性,以达到产品质量标准。以瓷砖生产为例,在烧成带上要求的温度范围为 $1200\pm 5^{\circ}\text{C}$,才能保证其质量和几何尺寸。如果温度高出规定范围 10°C ,就会收缩1毫米并有烧裂的危险。仅凭经验和眼睛观察,总误差范围难以做到精准控制,这就需要温度计量仪表提供可靠的科学数据,才能保证瓷砖生产质量(舒建立,1998)^[25]。最后,工业计量可以减少产品质量特性值的波动。通过减少产品质量特性值的波动,可以大大提升产品的合格率,从而达到提升产品质量的目的。这一点要与前文中减少产品质量特性值的误差范围相区别,前者是通过减少误差范围使产品质量达到一定的技术标准,后者则是减少波动来保证产品质量的稳定性,避免产品不合格率过高。因此,本文提出如下研究假设:

H₁:工业计量能够提升制造业企业的产品质量。

2. 工业计量对生产成本的影响

产品生产过程中所包含的成本主要有原材料成本、人力成本、管理成本、设备成本、设备折旧成本、能源消耗等(Anderson,2009)^[26]。工业计量降低产品成本的机理在于:首先,工业计量可以降低原材料的消耗。降低消耗是降低成本的根本途径,一方面,企业通过加强工业计量管理,可以实现精准的消耗考核,从而提高原材料的使用率或降低原材料消耗定额,以达到降低产品生产成本的目的;另一方面,通过工业计量的量值溯源倒逼企业采用先进技术,进行技术改造,例如,改造设备、改造工艺、改进产品设计等,从而实现合理用料以及生产成本的降低。其次,工业计量可以降低生产时的能源消耗。计量支撑企业节能减排属于能源计量的范畴,能源计量是工业计量的一个重要分支,是推动能源结构调整、能源利用效率提高和新能源开发利用的“标尺”。通过计量手段,企业可以获得能源输送、利用和转化等各个环节的能源损失与效率信息,并进行重点监控或整治,以降低企业生产的能耗。比如光伏产业,以275瓦的标准太阳能电池组件为例,在企业设备测量能力不变的情况下,标准组件的测量准确性提升0.5%,可以让企业产品平均功率波动减少一瓦,若按中国每年光伏企业产能五吉瓦来计算,每提升0.5%计量不确定度,至少可以节约6700万元的成本支出(方向,2015)^[27]。最后,工业计量可以提高生产效率来降低人力成本、管理成本、设备折旧成本等。采用更精准的测量技术及质量保障技术,广泛使用通用和专用的自动化测量仪表和控制仪器,采用数据集中管理等,可以减少劳动时间、提高生产效率,从而降低生产中的人力成本、管理成本、设备折旧成本等。因此,本文提出如下研究假设:

H₂:工业计量能够降低制造业企业的生产成本。

3. 工业计量对企业技术创新的影响

工业计量影响企业技术创新的机理在于:第一,计量作为科学技术的基础与前沿研究领域,对科学技术的发展具有显著的引领作用。在科学研究中,实验数据的搜集和分析至关重要,它们为揭示科学规律或得出结论提供了依据。而这些实验数据的搜集则主要通过计量手段实现,其准确性直接关系到实验结果的可靠性乃至新的科学规律的发现。第二,制造业领域的技术创新与尖端计量技术之间存在着强耦合关系。一方面,计量的量子化变革为我国制造业企业转向智能制造提供了一个机会窗口,量子计量与信息技术的融合为先进制造业提供了共性通用技术,自动定位、自动控制施力、自动对准、自动加工、自动测量与控制,先进制造过程中的每一步都要靠精准测量来保证;另一方面,先进制造业的发展使得传统计量器具逐步被更加智能化的测量系统所替代,计量

仪器设备的精确度得到了显著提升,自动化程度也大幅提高。计量测试不再是简单的测量工具,而是发展成为集传输、分析、执行等功能于一体的数字化、动态化、智能化、网络化系统。第三,专业领域的技术创新,如新产品与新工艺的产生,往往源于对传统产品、传统工艺的持续改进,在这一过程中,工业计量发挥着不可或缺的作用。新产品、新工艺在推向市场之前,必须经过严格的计量标定和检测,确保其性能稳定、安全可靠。只有这样,才能形成真正具有竞争力的技术形态,实现有效的企业技术创新。因此,本文提出如下研究假设:

H₃:工业计量能够促进制造业企业的技术创新。

工业计量会影响制造业企业的产品质量、生产成本等,这些都会直接影响到企业的经济效益。其中,工业计量提升产品质量、降低生产成本对制造业所带来的经济效益增量可以分为两大部分:一是工业计量通过提升产品质量所带来的效益增量,包括提升产品品牌价值、增加市场份额、提高产品定价能力、减少返工和废品率等的价值增量;二是工业计量通过降低生产成本所带来的效益增量,包括降低资本投入、劳动力投入、原材料消耗、能源消耗等的价值增量。而工业计量所影响的企业技术创新活动又会进一步影响企业的经济效益,其发挥作用的机制主要在于:在实际生产活动中,基于工业计量的基本活动,如计量器具的检定、校准、测试、检验与检测等,能够帮助企业更深入地认识各种质量特性、要素投入配比,以谋求质量的改进、成本的降低。在持续的测量—认知—改进的过程中,一方面,产品特性更为优化、生产效率得以提升;另一方面,工业生产过程的各个环节相互关联、环环相扣,多个环节技术能力持续改进,这为更先进的质量、成本管理体系的形成提供前提条件。因此,由工业计量所影响的企业技术创新活动需要通过产品质量的提升以及生产成本的下降来进一步影响制造业企业的经济效益。如前文所述,企业经济效益的提升又是制造业升级在微观层面的表征,因此,本文提出如下研究假设:

H₄:工业计量能够通过提升产品质量、降低生产成本来提升制造业企业的经济效益,进而引致制造业升级;工业计量还能够影响制造业企业的技术创新活动,技术创新又可以进一步通过影响质量和成本来提升制造业企业的经济效益,进而引致制造业升级。

4. 工业计量对制造业升级宏观层面影响的进一步分析

从宏观层面来讲,制造业升级体现为整个行业的技术进步。工业计量影响制造业行业技术进步的机理在于:第一,制造业企业持续的技术创新活动可促进对于现有生产知识和经验的突破性进展,从而带动整个行业的技术进步。第二,工业计量技术使得生产过程中资本、劳动力等生产要素的配置更为优化,在固定的要素投入下,要素间的融合更加充分、效率更高,进而推动制造业全要素生产率的全面提升。第三,工业计量的发展还可以不断催生出新的测量原理、测量手段和测量仪器,而准确、可靠、一致、有效的计量测试数据是促使制造业新技术、新业态、新产品不断涌现的前提,可以在更高层次上直接影响制造业升级。第四,在全球化背景下,产品的生产环节分散于全球各国,工业计量给制造业企业所带来的影响,可以使制造业企业不断跻身全球价值链和创新链的重要“节点”位置,使企业能够学到更为先进的生产技术和生产工艺,以更低的成本来实现制造业的技术进步。第五,计量标准的发展直接影响到国际技术标准制定主导权的争夺。在经贸往来中,民族、语言、文化等方面所存在的巨大差异,使交易中有关计量标准的“摩擦”不断产生,国际贸易交接和品质评估等标准成为一种贸易壁垒手段。例如,美国石油协会(API)在国际石油行业享有绝对技术权威,其所发布的石油钻杆螺纹标准中的加工制造螺纹准规往往作为螺纹测量标准发给有关制造和检测机构使用,以保证各企业产品的一致性。因此,我国工业计量发展水平将直接影响到我国在产品技术国际标准制定中的参与程度、行业话语权和主导权,这是当前及未来国内产品“走出去”后能否占据国际市场的决定因素。当前,工业计量已发展到量子计量时代,世界各国在计量标准领域又站在了同一起跑线上,这为我国制造业实现弯道超车提供了契机。国际

技术标准制定主导权的抢占,不仅可为我国制造业技术进步提供明确的方向,也倒逼着制造业内部的结构调整和技术革新。

与此同时,由工业计量引致的行业层面的技术进步又会反馈到企业的工业计量工作中,进一步促进企业的产品质量提升、生产效率改善和技术创新活力的提升。如此,形成了多向链接、循环反馈的影响机制,不断推动制造业升级(如图1所示)。

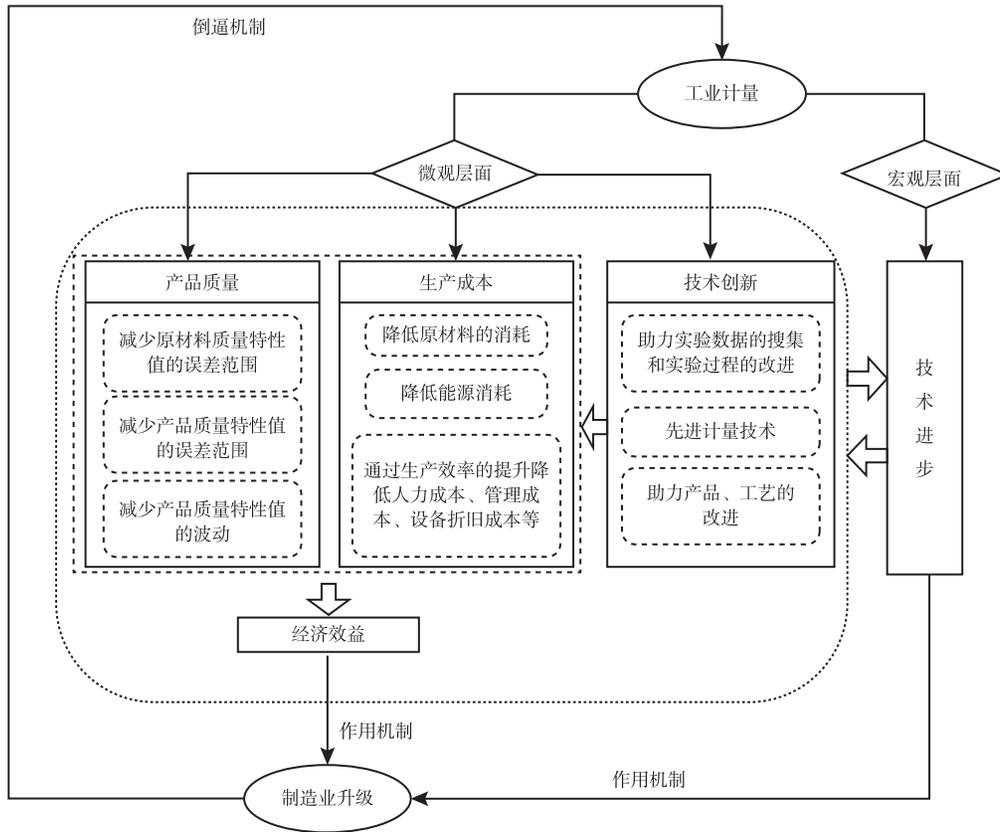


图1 工业计量对制造业升级影响的机制

三、问卷设计与实证检验

由于工业计量对制造业升级的影响仍是一个相对较新的研究领域,在经济学与管理学领域理论积累和可借鉴的研究实践相对薄弱,本文采用Lee(1991)^[28]提出的在组织管理研究中对于一个新概念的提出可以将实证方法与诠释主义相结合的分析框架对这一全新的研究范畴进行全面的理解和分析,以确保研究结果的信度和效度。即先以实证主义范式下的定量研究方法,通过对一个未知现象的可观测表征、行为或数据的关系分析证实或证伪某些预定的理论假设,再利用诠释主义范式下的定性分析对于前述关系或结论进行验证和解释。在本研究中,先通过问卷调查的方法搜集不同企业在工业计量、产品质量、生产成本、技术创新、经济效益等方面的情况与可观测数据,运用结构方程模型对前文影响机理、研究假设进行分析与讨论(张近乐和赵娟,2014^[29];张雪梅等,2016^[30]),构建关于工业计量与产品质量、生产成本、技术创新、经济效益等潜变量之间的结构方程模型,探讨工业计量对制造业升级的影响。

1. 问卷设计与数据收集

工业计量能力作为制造业的基础能力,尽管其对制造业升级的作用机制尚不明晰,但在实践中,

工业计量对制造业升级的推动作用却是显而易见的,且如前所述,已有文献初步对这种作用进行了评估和测度。由于工业计量这一概念尚未形成经济学范畴下的理论定义,因此,为了更好地衡量工业计量对制造业升级的影响,本研究在国家市场监督管理总局的支持下,在全国范围内对制造型企业收集数据,以便对工业计量这一概念进行学术度量。在全面调查前,研究团队于2021年9月对无锡一家中型芯片制造企业和天津一家大型制药企业进行了深度访谈,依据访谈反馈和建议,结合现有理论研究,初步设计了本研究的调查问卷,此后又对问卷进行了先验性测试,根据测试结果对问卷内容进行了修订和完善,以得到正式的调查问卷。问卷共分为六个部分,包括:(1)企业基本情况,主要包括企业的类型、所属行业、注册资本、性质等;(2)企业从事计量的人员情况,包括人员数量、学历、拥有专业证书、接受专业培训等;(3)企业的计量仪器情况,主要是国产、进口、自主研发计量仪器在企业高、中、低端产品研发生产中所使用的比例,以及企业计量仪器的精度、测量范围、可靠性的评价水平;(4)企业的计量检测方法情况,主要是简单测量和复杂测量、单次测量和分阶段测量、物理测量和化学测量^①、自主测量和第三方测量在企业生产中发挥的作用评价;(5)企业的计量技术创新与管理情况,主要是针对计量仪器检查维护、计量研发部门的人员与资金投入、计量工作的支持与参与程度、制度化程度等方面的评价;(6)计量对企业的影响及企业的效益情况,主要包括企业的生产成本、产品质量、研发投入、专利申请、营业收入、利润等,以及计量对这些方面的影响评价。

本次调查问卷结构与题项设置如表1所示。

表1 问卷的结构与题项设置

序号	问卷结构	题项	主要调查内容	测量指标来源
1	企业的基本信息	Q1~Q10	企业类型(是否是生产、研发、制造型企业)、所属行业、成立时间、所属区域、注册资本、员工人数、企业性质(民营、国有还是三资)、主要产品、产品层级(高端、中端还是低端)、计量检测校准(自己做还是委托第三方)	调研获取
2	企业从事计量的人员情况	Q11~Q14	从事计量工作的人员数量、主要人员的学历情况、拥有计量专业资格证书的比例、接受过专业计量培训的比例	调研获取
3	企业的计量仪器情况	Q15~Q16	高中低端产品研发生产中所使用的计量仪器中国产、进口、自主研发的比例(按照0-10去评价不同测量方法在企业生产中的应用程度,数字越大,程度越大)	调研获取
4	企业的计量检测方法情况	Q17~Q20	计量仪器的精度、测量范围、可靠性的评价(按照0-10去评价不同测量方法在企业生产中的应用程度,数字越大,程度越大)	调研获取
5	计量技术创新与管理情况	Q21~Q26	计量仪器检查维护、计量研发部门的人员与资金投入、计量工作的支持与参与程度、制度化程度等方面(按照0-10去评价不同测量方法在企业生产中的应用程度,数字越大,程度越大)	调研获取
6	计量对企业的影响及企业的效益情况	Q27~Q33	主打产品的出厂不合格率、控制产品生产工艺、原材料成本、能源消耗、研发投入占企业总体营业收入的比例、近三年内总的专利申请量、专利中与计量相关的专利数量、去年的营业收入、去年的利润	舒建立(1998) ^[25] , Kocaeffe等(2015) ^[11] , 尚晓丽和白鑫(2014) ^[16] , 方向(2015) ^[27] , Anderson(2009) ^[26] , Powell(1995) ^[31] , 陈强远等(2020) ^[32]

资料来源:作者整理

① 单次测量是指通过一次性的测量就能得到所需参数的测量方法;分阶段测量是指某些参数的测量需要通过一系列不同阶段的测量才能实现的测量方法。物理测量是指对产品的长度、重量、温度、体积、电流、光照强度等方面的测量;化学测量是指通过使用标准物质或摩尔等物质的量的相关参数来进行的测量。

问卷中涉及评价的问题主要采用李克特(Likert)量表的评分原则,按照0~10去评价,数值越大表示作用越大、程度越高。在上述六个部分中,第1部分是关于企业计量基本情况进行的调查,以便了解企业规模、企业性质、企业类型等,并引入这些因素作为模型的控制变量;第2、3、4、5部分分别代表了以工业计量为潜变量的四个关键观测变量,即计量人员、计量仪器、计量方法、计量管理,第6部分的调查数据涵盖了质量、成本、技术创新、效益四个潜变量的观测变量或衡量变量。

问卷设计完成后,初步在制造业企业中向高管或计量管理人员发放了64份问卷进行先导性调查,以便从测试者那里获得对问卷的反馈和评价,比如用词是否准确、易于理解,问题顺序的设置是否合理,问卷长度是否合适,回答过程是否流畅等,并初步对问卷的效度和信度指标进行了测试。根据测试反馈,作者对问卷中部分问题的措辞和顺序进行了调整。先导性调查收集的64组数据没有用于最终的数据分析中。

问卷的发放形式以网络问卷及实地调研发放为主,通过邀请或者借助问卷星发放给不同企业的计量技术或管理人员来填写,2021年12月—2022年3月共回收问卷400份,其中有效问卷350份,有效率为87.5%。经过统计,参与本次问卷调查的企业涵盖了华东(50.29%)、华北(16%)、华中(5.14%)、华南(14.29%)、西南(1.14%)、西北(10.29%)、东北(1.14%)、其他(1.71%)等区域,涉及资源加工类(1.71%)、服装纺织(0.57%)、石油化工(4.57%)、采矿挖掘类(1.14%)、机械设备(23.43%)、电子产品(32%)、医药制品/医疗器械(9.71%)、食品饮料(1.71%)、汽车/航空(18.29%)、其他(6.87%)等多种不同的行业,这些企业都是制造业领域工业计量活动与其生产工艺过程高度结合的企业。企业性质中民营、国有、三资企业分别占65.14%、30.86%、4%,企业规模中20人以下占比为8%,20~300人占比37.14%,300~1000人占比13.72%,1000人以上占比41.14%。

2. 问卷信度和效度检验

(1)效度和信度检验。问卷的效度和信度检验主要用于对量表式问卷的检验。本研究使用Cronbach's α 系数来查证问卷各个题项的内在信度,当Cronbach's α 值大于0.7时,就可以说调查问卷设计是可以接受的。效度分析用于测量题项设计是否合理。在问卷的结构效度检验上,采用KMO和Bartlett球形检验,目的是验证量表的题项是否和量表的结构相符,KMO值大于0.6,代表适合;Bartlett球形检验值用以检验题项间相关系数是否显著,如果显著(即 $p < 0.05$)则适合做因子分析。

表2 信度和效度检验

Cronbach's α 系数	KMO 值	Bartlett 球形检验值	Sig
0.906	0.785	1194.916	0.000

由表2可知,量表的Cronbach's α 系数大于0.9,这代表量表的信度和一致性很好。KMO值在0.7~0.9之间,代表适合做因子分析;Bartlett球度检验结果显示,近似卡方值1194.916,数值比较大,显著性概率为0.000($P < 0.05$),因此,拒绝Bartlett球度检验的零假设,说明该量表适合做因子分析,该量表的效度结构较好。

表3 测量题项的聚合效度检验

变量	测量指标	因子载荷	组合信度 CR	平均方差萃取量 AVE
企业控制变量	企业类型	0.441	0.665	0.713
	成立时间	0.817		
	所属区域	0.266		
	员工人数	0.823		
	企业性质	0.461		

续表 3

变量	测量指标	因子载荷	组合信度 CR	平均方差萃取量 AVE
工业计量	计量人员	0.564	0.896	0.852
	计量仪器	0.858		
	计量方法	0.826		
	计量管理	0.804		
质量	控制生产工艺	0.750	0.763	0.720
	不合格率	0.750		
成本	原材料成本	0.772	0.773	0.910
	能源消耗	0.941		
	利用计量数据	0.915		
效益	营业收入	0.993	0.686	0.993
	利润	0.993		
技术创新	专利申请量	0.007	0.711	0.583
	研发投入	0.728		
	技术改进	0.838		

表 3 列示了本问卷的每个潜在变量,分析潜在变量对应题项的组合信度 CR、平均方差萃取量 AVE,可以看到,企业控制变量、工业计量、质量、成本、效益、技术创新的对应题项,其组合信度都在 0.6 以上,平均方差萃取量均大于 50%,说明本次测量量表数据具有较好的聚合效度。

(2)共同方法偏差检验。当研究的每份问卷来源于同一位回答者,可能导致共同方法偏差问题。本研究利用 Harman 的单因子检测方法检验共同方法偏差的严重程度以保证研究结论的可靠性,将问卷所有题项同时做探索性因子分析,在不做旋转且特征值大于 1 时,第一个主成分能够解释 30.26% 的变异量,小于建议值 50%,表明本研究数据不存在显著的共同方法偏差问题。

3. 工业计量对制造业升级影响的结构方程模型

(1)结构方程模型构建与估计。结构方程模型也被称为协方差结构模型,是一种应用线性方程表示观测量与潜在变量以及潜在变量间关系的统计分析技术,经常被用于检验理论假设中各变量间的路径关系以及中介、调节等间接效应的分析。根据前文中工业计量对制造业升级的影响机理与理论模型分析,结合问卷调查问题,本文构建了工业计量对制造业升级影响的结构方程模型,如图 2 所示。该结构方程模型中共有五个潜在变量,即工业计量、质量、成本、技术创新、经济效益,其中作为解释变量的工业计量为外生潜变量,作为制造业升级微观表征的经济效益为内生潜变量,工业计量通过质量、成本这两个间接变量影响经济效益,技术创新是工业计量的内生潜变量。这五个潜在变量又包含了 13 个可测变量,其中计量人员、计量仪器、计量方法、计量管理分别是根据各自问卷调查题项数据提取的公因子得到的。各个路径上的估计关系见图 2 中线条上的数字(标准化下的估计结果)。

本研究使用 AMOS21.0 数据处理软件对数据进行处理,首先检验结构方程是否成立,得到方程估计后的拟合指数,如表 4 所示。在评价模型的拟合优度时,一般用 χ^2/df ,即卡方比率,Wheaton 等(1977)^[33]认为 χ^2/df 在小于 5 的水平范围内就可以被接受;RMSEA 是反映协方差模型信息的重要指标,通常情况下,当 RMSEA 小于 0.05 时表示模型拟合效果非常好;GFI 是假设模型能够解释的方差和协方差之间比例的测度,而 AGFI 是诊断模型拟合是否是过多协相关系数的过度拟合数据,GFI 和 AGFI 的值域均在 0~1 之间,在 0~1 的范围内,数值越大表示拟合度越好;拟合指数还包括 NFI(标准化拟合指数)、IFI(差别拟合指数)和 CFI(比较拟合指数),三

者的值域在 0~1 的范围内,值越大说明拟合程度越高。本文结构方程模型得到的拟合指数如表 4 所示。

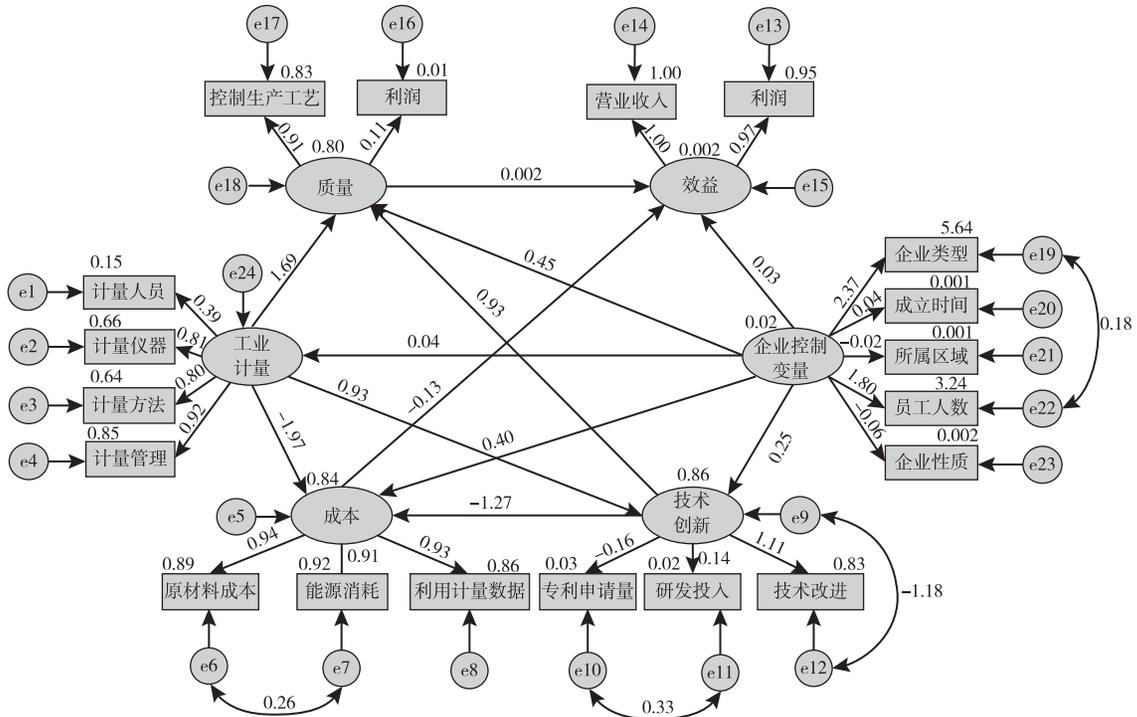


图 2 工业计量对制造业升级影响的结构方程模型

注:线条上的系数代表因子载荷,方框、椭圆上的系数代表对应变量的测量误差值

表 4 拟合指数

拟合指标	χ^2	χ^2/df	RMSEA	SRMR	GFI	PGFI
标准值	378.45	2.523	0.041	0.037	0.885	0.910
拟合指标	AGFI	NFI	NNFI	PNFI	IFI	CFI
标准值	0.900	0.931	0.911	0.940	0.924	0.913

本模型的自由度为 70,由拟合指标可知,该模型的 $\chi^2/df=2.523$,小于 5 的标准, $PGFI=0.910$ 、 $NFI=0.931$ 、 $NNFI=0.911$ 、 $PNFI=0.940$ 、 $IFI=0.924$ 、 $CFI=0.913$,均大于 0.9, $GFI=0.885$ 、 $AGFI=0.900$,也接近于 0.9; $REMSA$ 为 0.041, $SRMR$ 为 0.037,均小于 0.05,基于模型结果,说明该模型的解释力和预测能力都比较理想,该模型的拟合效果也比较好。

根据图 2 结构方程模型构建中各个路径的标准化估计系数来讨论工业计量、质量、成本、技术创新、经济效益之间的关系,同时,本文利用 t 值与 p 值考察了各路径估计系数的显著性,若显著,则代表两变量的影响关系是显著性关系。可以看到:

从工业计量到质量的标准化路径系数为 1.69 ($t=21.702, p=0.000 < 0.05$),在 5% 的显著性水平下显著,说明工业计量对质量具有显著的正向影响,研究假设 H_1 得到验证;从工业计量到成本的标准化路径系数为 -1.97 ($t=-7.479, p=0.000 < 0.05$),说明工业计量对成本具有显著的负向影响,研究假设 H_2 得到验证;从工业计量到技术创新的标准化路径系数为 0.93 ($t=31.213, p=0.000 < 0.05$),说明工业计量对技术创新具有显著的正向影响,研究假设 H_3 得到验证;从质量到效益的标准化路径系数为 0.002 ($t=4.015, p=0.000 < 0.05$),说明质量对效益具有显著的正向影响,从成本到效益的标准化路径系数为 -0.13 ($t=-1.776, p=0.076 < 0.10$),在 10% 的显著性水平下显著,说明成本对效益具有显著

的负向影响,根据工业计量对质量、成本的估计系数,可以看到工业计量通过质量、成本对效益产生正向影响,同时,技术创新对于效益的影响也是通过质量和成本发挥作用的,研究假设 H_4 得到验证。

研究结果显示,工业计量和质量、成本、技术创新、经济效益之间关系的假设都通过了检验。说明工业计量能够有效提升制造业企业的产品质量、降低生产成本、促进技术创新,并通过质量、成本的间接效应对制造业企业经济效益产生正向影响,验证了本文对工业计量与制造业升级关系的机理诠释。

进一步地,本文将样本分为两部分:一部分为1000人以上的大型企业;另一部分为其他所有企业(即中小型企业)。对这两部分样本进行分组结构方程模型分析,来判断不同规模的制造企业是否都能支持本研究的假设,如表5所示。其中,模型M1至M5依次代表因子载荷等同检验(即形态相同)、因子方差等同检验(即两组因子方差的系数 γ_{11} 是否等同)、误差方差等同检验(即两组因子误差方差的系数 γ_{21} 是否等同)、因子协方差等同检验(即两组因子协方差的系数 β_{21} 是否等同),以及各个测量指标的测量误差等同检验(即系数全部等同)。通过卡方检验结果可以看到,企业规模在1000人以上和低于1000人的两组结构模型的路径系数具有一致性。

表5 多组结构方程模型各模型拟合结果及路径系数检验

模型	模型类型	df	Chi-Square ($p = 0.000$)	RMSE	NNFI	CFI	卡方检验	判断结果
M1	形态相同	148	72.95 ($p = 0.000$)	0.044	0.908	0.91	—	模型拟合结果较好,说明两组结构模型具有结构一致性
M2	系数 γ_{11} 等同	149	72.91 ($p = 0.000$)	0.043	0.908	0.91	-0.03	卡方值变化不显著,说明两组结构模型的系数 γ_{11} 一致
M3	系数 γ_{21} 等同	149	73.23 ($p = 0.000$)	0.043	0.908	0.91	0.27	卡方值变化不显著,说明两组结构模型的系数 γ_{21} 一致
M4	系数 β_{21} 等同	149	75.84 ($p = 0.000$)	0.045	0.908	0.91	1.90	卡方值变化不显著,说明两组结构模型的系数 β_{21} 一致
M5	系数全部等同	151	76.73 ($p = 0.000$)	0.041	0.908	0.91	0.59	卡方值变化不显著,说明两组结构模型的路径系数具有一致性

(2)直接效应、间接效应与总效应。基于质量、成本的间接效应,在结构方程估计结果的基础上,分解出工业计量对制造业升级影响的总效应、直接效应与间接效应(标准化),如表6所示。

表6 工业计量对制造业升级影响的总效应、直接效应与间接效应

关系路径	总效应	直接效应	间接效应
技术创新←工业计量	0.929	0.929	
质量←工业计量	0.825	0.009	0.816
成本←工业计量	-0.796	-0.742	-0.054
效益←质量	0.002	0.002	
效益←成本	0.037	0.037	
效益←工业计量	0.031		0.031
效益←技术创新	0.048		0.048

可以看出,工业计量对质量的总效应为0.825,其中直接效应为0.009,间接效应为0.816,间接效应较大;工业计量对成本的总效应为-0.796,其中直接效应为-0.742,间接效应为-0.054;工业

计量对技术创新的总效应为 0.929,全部来自于直接效应;质量对效益的总效应为 0.002,全部来自于直接效应;成本对效益的总效应为 0.037,全部来自于直接效用;工业计量对效益的效应为 0.031,全部来自间接效应;技术创新对效益的总效应为 0.048,全部来自于间接效应。总结来说,工业计量对质量具有显著的正向影响,对成本具有显著的负向影响,对技术创新具有显著的正向影响;工业计量通过质量和成本的间接效应对经济效益(制造业升级的微观表征)产生显著的正向影响;技术创新通过质量和成本的间接效应对经济效益(制造业升级的微观表征)产生显著的正向影响。

四、典型企业的案例分析

1. 方法与案例选择

由于问卷调查数据来自于企业个体,鉴于数据可获得性的局限,对于将工学领域概念引入经济学范畴而言支撑力度略显不足,且由于企业所属行业、生产产品不同,不同类型的企业之间计量的仪器、方法与技术等方面很难一致,微观企业的巨大差异性也使从宏观层面验证工业计量通过技术创新引领制造业升级的关系较为困难。因此,本文在问卷调查的基础上,进一步选择航天领域两家提供行业计量标准并担当行业内领军抓总角色的企事业单位进行案例研究。一方面,通过定量与定性两种研究方法的综合使用与交叉验证,强化研究结果的可靠性;另一方面,也为了在宏观层面对工业计量对制造业升级所发挥的作用进行验证。

案例研究是社会科学研究中一种应用领域很广泛的研究方法,既可以应用在归纳式的逻辑范式中,即通过对典型案例的分析,发现一般性的结论或规律,即从“特殊”到“一般”;也可以应用在演绎式的研究方法中,以先验的理论假设为指导进行研究设计、数据收集和分析,即从“一般”到“特殊”(井润田和孙璇,2021)^[34]。本文采用案例研究的方法主要是基于三方面的考虑:一是从研究方法来看,先前以调查问卷和统计分析为主体的定量分析,得出的是相对具有普遍性的结论,因此需要运用案例分析这一质性化研究方法,在实际的案例情境中对前文结论进行实证检验,正如 Yin(2009)^[35]所说的通过案例来检验假设就如同在自然科学中利用实验来检验真理一样。通过量化研究与质性研究在研究方法中的三角验证,使得结论更加扎实可靠。二是从研究客体来看,从经济学和管理学的视角来解读工业计量这一概念尚属一个崭新的尝试,案例研究方法能够很好地帮助研究者挖掘和深入理解未解现象之下的潜在规律和解释,以多来源的证据寻找趋同的结论,为理论的构建提供坚实的逻辑支撑(Eisenhardt,1989)^[36]。三是从研究内容来看,本文先前定量研究所收集的问卷数据只能验证微观层面工业计量对企业效益的影响,无法验证宏观层面工业计量标准对技术进步进而对制造业升级产生的影响,需要通过对行业内具有超然地位的标准制定者或领军企业的调研访谈来对其进行补充验证。

本文案例研究采用的是演绎式逻辑范式,选取的案例在于检验先前的理论假设,并以实证数据解释理论的内涵与边界。根据 Yin(2009)^[35]的案例研究方法,应该采用理论抽样法选择关键案例来检验已有理论。本文选取的是中国航天科技集团下属的两家企业作为案例样本,理由如下:①这两家企业都是航天领域计量测试方面的领军抓总单位。其中,A单位是从事空间飞行器(如卫星、飞船、深空探测器等)各种环境模拟试验以及总装测试的专业性机构,是全面深入应用各类型工业计量,且工业计量会直接影响到其产出和结果的单位;B单位是国防科技工业电学一级计量站,负责全国国防系统电学量值传递,是国家航天器产业计量测试中心,国家卫星应用产品、静电防护产品的质量监督检查中心,是国防电学产业领域计量标准产生的地方。这两家单位是航天产业内的标杆性企业。②这两家单位的业务分别涵盖了航天产业内计量标准产生与计量应用两个方面,为本文研究工业计量与微观层面的质量、成本、经济效益以及宏观层面的技术进

步、标准以及产业升级等方面的关系提供了很好的素材,具备案例研究所要求的典型性和代表性。

2. 数据收集与处理

本文主要采取面对面的半结构化访谈的方法收集数据。2022年9月,作者团队深入企业实地调研,以录音的形式形成数据原始文本,并在访谈结束后第一时间对原始数据进行编码处理。处理的方式采用的是 Miles 和 Huberman (1994)^[37]提出的质性数据分析技术,即数据缩减、数据陈列、结论提取以及结论验证。该过程是一个反复迭代的过程,使用了 Glaser 和 Strauss (1967)^[38]在扎根理论方法中提出的持续比对(constantly comparison)技术。在从访谈数据中提炼出代码、概念和范畴后,要结合访谈信息检查其理论意义是否成立,即是否与先验的理论假设呈现内部一致性。若不一致,则要再次回到原始数据中,检查编码过程的合理性,或补充关键证据,并重新进行代码和类别的提取,以确保质性研究结果的效度和信度。访谈数据来源如表7所示。

表7 访谈数据来源

样本企业	调研次数	访谈时间(小时)	录音字数(万字)	访谈人次	访谈对象	主要访谈内容
A	3	4	7.59	4	A单位业务主管副部长、热学试验室主任、力学试验室科员、计量主管人员	工业计量在测验测试中的应用,以及对结果或产出的影响
B	2	2.5	4.22	2	B单位静电事业部部长、安全监督员	计量标准与计量体系的形成,以及对于产业的影响

3. 案例分析及发现

该阶段主要通过阐述 A、B 两个航天企业三个卫星型号项目在测试、发射及在轨运行时一些关键参数指标改进与计量方法或计量技术进步之间的关系,以及一个航天领域计量标准与计量体系的构建过程,以跨案例综合(cross case synthesis)与模式匹配(pattern matching)等方法分析计量与质量、成本、经济效益,以及技术创新之间的相关关系。案例数据、概念、范畴及相关分析结果如表8所示。举例来说,在对某型号导航卫星业务主管部门领导访谈过程中,受访者提到“原子钟对于温控的要求非常高,控温精度越高,钟的稳定性越好,时间的准确性也越好”。在这里,“控温精度”就是从原始证据中提炼出的一个“概念”,不同的应用场景会产生类似很多不同的概念,内涵相近的概念进一步聚集便形成了跨应用场景的“范畴”。此例中,“控温精度”实际上反映的是原子钟这一应用场景下的“计量精度”,这里的“计量精度”就是由很多源自于不同应用场景下的概念聚集而成的一个“范畴”。“时间的准确性”是在本应用场景中提炼出来的一个“概念”,它从属于一个更大的范畴“效益变量”中。需要特别指出的是,由于卫星是一种公共产品,其效益的表达与传统意义上具有商业属性的产品不同,即不适合单纯用经济价值或收益来代表其效益,在本文案例访谈中,受访者认为可以用卫星所实现的性能指标,包括质量、可靠性、安全性等,以及由于卫星的成功所带来的社会价值,包括荣誉、国家地位提升等来衡量卫星事业的效益,因此,上述例子中“时间的准确性”作为描述卫星所实现的性能指标可以被归为“效益变量”的范畴下。可见,计量精度正向相关于效益变量。此外,在访谈中,关于技术创新这一概念,受访者认为卫星在研发、制造、测试、发射、运行、回收等各个环节中的创新性成果有机的集成在一起,形成的最有价值的东西是中国航天的制度、标准与体系。单点的技术突破不足以支撑中国航天事业的长足发展,而只有整个体系的进步才能构成发展的牢固基石。因此,技术创新在本文案例中是以形成卫星的质量标准和体系来进行描述的。比如,在谈到中国航天领域广泛应用的“静电体系”时,受访者谈到“90年代中国的航天事业经历了一段时间的失利史……各种院长令、质量要求、21条安全要求、质量和管理双归零等……定量分析,发现大概有70%的卫星失效,是由于充放电问题引起

的”,这一段证据材料反映的是“计量活动”这一范畴。受访者继续谈到“于是开始做静电体系……从无到有……成为国家标准……计量从一个比较基础的东西上升到了体系,对于卫星这一类比较高精尖的产品,对它是一个质量的提升……”,这一部分证据材料落入“体系”“国家标准”这一类范畴下,而这一类范畴对应的正是航天这一行业领域的技术创新。可见,计量活动正向相关于技术创新。

表 8 案例分析数据与结果汇总表

案例情境	典例证据援引		概念	范畴	相关关系	
某型号卫星	力学领域	振动	振动和噪声是卫星的隐形杀手……火箭发射过程,振动很大,且通过结构层层放大,到上半部分,振动更大……用传感器计量振动……在发射阶段,传感器精度只需达到10毫伏每克(研究者注:较低的精度要求,10 ⁻¹ 量级)……星箭分离的时候,极大的冲击……传感器精度需要达到1毫伏每克(研究者注:10 ⁰ 量级),以获得更大的量程……卫星在轨飞行时,需要调整姿态,产生微小振动,引发局部结构的放大,导致卫星某方面性能降低甚至失效……需要更高的精度的微振动传感器,达到1000毫伏每克(研究者注:10 ⁻³ 量级)……下一步,光纤传感器,达到10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁶ 的数量级……	振动等级、传感器精度	计量精度	计量精度正向相关于效益变量(即卫星性能)
			卫星性能	效益变量		
	时间领域	原子钟	卫星导航时,卫星距地面距离相对于地面上的一段位移而言,是个很大的数量级,卫星是根据位移测速的,比如……,卫星测速对于时间精度的要求非常高……铷原子钟时间精度达到10 ⁻⁹ 秒的数量级,从而达到分米级的导航精度……	时间精度	计量精度	计量精度正向相关于效益变量(即卫星的导航性能)
				导航精度	效益变量	
	温度领域	原子钟	原子钟对于温控的要求非常高,比如……,控温精度越高,钟的稳定性越好,时间的准确性也越好	控温精度	计量精度	计量精度正向相关于效益变量(即卫星的时间精度)
				时间精度	效益变量	
某型号遥感卫星	温度领域	相机	高分辨率相机对温度非常敏感,它要求的测温精度非常高	测温精度	计量精度	计量精度正向相关于效益变量(即卫星的分辨率)
			高分辨率	效益变量		
	湿度领域	相机	90年代,卫星测试中多次发现相机成像出现问题,多方排查后发现是测试场地环境湿度条件不能满足要求。那时对于湿度的测量主要以干湿球温度计,毛发温湿度计和指针式温度计为主,这些仪表的最大允许误差可达±7.5%RH……经过多年科研攻关,测试现场环境条件、湿度仪表的范围和准确度都得到了大幅的提升,湿度测试仪表的最大误差不超过的±2%RH……测量方法也得到了改进,由单点、人工读数记录变为多点,数据自动记录且可多湿度单位自由互换的模式……再没有出现相机成像问题	湿度测量、湿度仪器、准确度、测试误差、测量方法	计量精度、计量仪器、计量方法	计量精度、计量仪器、计量方法均正向相关于效益变量(即卫星的成像功能)
				相机成像	效益变量	

续表 8

案例情境	典例证据援引			概念	范畴	相关关系
某型号气象遥感卫星	湿度领域	相机	由于湿度原因造成的卫星相机成像问题……决定建立湿度标准以填补当时航天湿度计量的空白……建立了航天第一个数据计量站和第一个湿度标准……现场湿度仪表有了溯源性,量值准确度也得到提高……湿度标准不断完善,湿度测量范围不断扩大,覆盖了从中高湿度到低湿、微湿各个湿度条件	溯源、准确度、湿度测量范围	计量精度、计量范围	计量范围、计量精度正向相关于技术创新(以标准体系的建立为代表)
			湿度标准、湿度可控	标准体系		
某型号深空探测卫星	力学领域	望远镜	望远镜的镜头在太空环境中会变形,需要计量变形精度,变形会直接影响到望远镜的观测	变形精度	计量精度	计量精度正向相关于效益变量(即卫星望远镜的太空观测能力)
			太空观测能力	效益变量		
某型号深空探测卫星	温度领域	相机	深空探测提出来一些更高端的温度控制要求……这类产品的测量范围很窄,要求的精度就很高……控温精度要达到0.1度,才能保证性能	控温精度、测量范围	计量精度、计量范围	计量精度、计量范围正向相关于效益变量(即卫星搭载相机的性能指标)
			性能指标	效益变量		
静电体系	体系的形成	卫星失效原因分析	90年代中国的航天事业经历了一段时间的失利史,那段时间航天器总是出各种各样的问题,报障碍卫星在轨失灵很多……各种院长令、质量要求、21条安全要求、质量和管理双归零等……定量分析,发现大概有70%的卫星失效,是由于充放电问题引起的。太空并非真空环境,存在离子效应,卫星在太空中由于离子注入,表面带压,当达到一定的耐压值,就会放电,击穿卫星,引起卫星失效,于是开始做静电体系……从无到有……成为国家标准……计量从一个比较基础的东西上升到了体系,对于卫星这一类比较高精尖的产品,对它是一个质量的提升……体系建设不能走拿来主义的路线,必须踏踏实实自己去做……	质量要求、安全要求、双归零	计量活动	计量活动正向相关于技术创新(以体系与标准的形成为代表)
			质量体系、国家标准、质量提升	质量体系、国家标准		
静电体系	体系的应用	卫星相关	体系不是一个或几个标准,而是一系列标准,比如插线板该怎么做?接地线、绝缘性该怎么管?卫星的星上产品怎么管?……关于成本,一颗卫星几个亿,比起为了节省成本,草率上天,结果在天上坏了,不如体系做得过一些,可靠性保证得多一点,所谓慢即是快……短期看起来花钱的事,长远来看反而是节省成本了……比如根据我们的静电体系,我们的地线是三相五线制,市面上一般三相四线制,我们比别人多一个地线……比如在应用符合我们静电体系的插线板之前,发生过很多起起火事故,而之后几乎完全杜绝了……这些都是无法估量也不可估量的经济价值和社会效益	一系列标准、静电体系、可靠性冗余	计量标准、体系、可靠性	计量标准正向相关于技术创新(以形成体系为代表),而技术创新(以体系为代表)正向相关于效益指标(以长远经济价值和社会效益为表征)
			节省长期成本、故障率降低	经济价值、社会效益		

续表 8

案例情境	典例证据援引			概念	范畴	相关关系
静电体系	体系的应用	其他方面	集成电路的洁净间就是静电体系的应用场景之一;铁西宝马汽车工厂无人喷漆车间,在每道工艺的前面都有两个柱子,这两个柱子是静电消除器;天津港爆炸事件其中第一次爆炸就是粉尘爆炸,而粉尘爆炸是典型的静电爆炸 加油站现在很少再出现静电着火现象,就是静电体系推广的结果	静电体系、体系应用、体系推广	体系	
				节省长期成本、故障率降低	经济价值、社会效益	

资料来源:作者整理

通过本文案例描述与分析(如表 8 所示),本文的研究假设在案例数据中得到了验证,即计量水平的提升,包括计量仪器、计量手段等,正向相关于卫星性能的提升,诸如质量、安全性、可靠性、功能性等方面。同时,计量的发展也促进了以体系为代表的技术创新的发展,而体系的进步则进一步推动了卫星及航天事业的进步,这是技术创新所带来的社会效应的绝佳体现。

五、结论与政策启示

1. 主要结论

本文在我国产业基础能力再造的现实背景下,创新性地构建了工业计量推动制造业升级的理论框架,从微观和宏观两个层面对其进行阐述。其中,制造业升级在微观层面表征为企业经济效益的提升。企业实际生产过程中的计量活动通过计量器具、计量人员、计量方法和计量管理等工作内容,可以促进产品质量的提升、生产成本的降低,从而达到提升企业经济效益的目的,还可促进企业的技术创新活动,并进一步对经济效益产生影响,以实现制造业向更高附加值、更高综合效率转型升级;制造业升级在宏观层面上表征为制造业行业整体的技术进步。工业计量可以通过助力微观企业技术创新实现突破性进展、优化要素配置、更好融入全球创新网络、形成国际标准倒逼技术革新、促进新业态和新产品的不断涌现等方式来引领制造业行业整体技术进步。同时,宏观层面的计量技术创新又会对微观层面的计量活动产生正反馈效应,形成工业计量对制造业升级多重、循环的影响机制。

本文进一步对制造业企业展开调查,以调研数据构建工业计量对制造业升级影响的结构方程模型。研究发现,工业计量对质量具有显著的正向影响、对成本具有显著的负向影响、对技术创新具有显著的正向影响;工业计量通过质量和成本的间接效应对经济效益产生显著的正向影响;技术创新也通过质量和成本的间接效应对经济效益产生显著的正向影响,而经济效益又是制造业升级的微观表征,这验证了本文对工业计量与制造业升级关系的机理解释。进一步地,本文又对中国航天科技集团下属的两家提供行业计量标准并担当行业内领军抓总角色的企事业单位进行了案例研究,一方面弥补了单一使用定量研究方法的局限性;另一方面也在宏观层面上直观、形象地呈现出了工业计量对制造业升级所发挥的作用。

2. 政策启示

随着国际单位制进入全面量子化时代及工业计量在工业生产过程中的全方位参与,工业计量对制造业升级的影响日益显性化。借助物联网、大数据、云计算、人工智能、虚拟现实等新兴技术所带来的更为网络化、智能化的数据收集与信息反馈手段,工业计量实现了对工业生产过程的实时全面测量与智能跟踪、检测、预警,并由此促进产品质量的提升、生产成本的下降以及技术创新活动的开展,进而从微观和宏观两个层面来引致制造业升级。因此,为了进一步深化我国工业计

量对制造业升级的影响效应,应高度重视经济新发展阶段产业基础能力提升的重要性,进一步完善顶层设计、政策引导和相应的产业规划,在全面提升我国工业计量实力的基础上进一步将其压实到企业生产管理过程中。

(1)切实推进工业计量在企业人、机、料、法、环等质量管理要素中的渗透。在调研中,我们发现在生产制造过程中很多企业存在不重视计量技术研发与管理、专业人才的缺乏等问题,这些都使工业计量活动难以更好地发挥其提升质量、降低成本、促进技术进步的作用。这就需要制造业企业提高计量意识,提高企业内部专业计量人员或计量管理人员的综合素质,积极培养计量专业人才;加强对计量器具设备的管理,及时更换符合前沿标准和技术的计量检测设备,有效使用计量器具;结合自身实际,开展计量测试需求分析,探索如何将工业计量应用于产品研发、设计、制造、检测、使用、维修、报废、回收等全生命链条,合理编制应用方案,形成有效需求;更重要的是,企业应建立计量管理体系,组建专门的工业计量部门,以制度化、体系化的管理来优化工业计量的人才、设备配置与使用,有效分析和运用计量检测数据,实现对生产全过程的精准控制。总之,以工业计量推动企业产品质量升级、管理精细化水平提升以及技术创新迭代升级,实现向计量要效益。

(2)探索多方资源力量联合攻关工业计量基础性、前沿性研究的路径。工业计量是制造业高质量发展的前提与基础,引领着制造业企业内部及行业整体的技术进步,工业计量技术必须走在产业发展的前列。为此,政府应抓住新一轮科技变革的契机,聚合各方力量,瞄准信息技术、高端装备、智能制造等重点领域迸发出的计量需求,形成数智化技术与计量测试技术一体化集成,集中合力进行前沿攻关;计量科研院所比如中国计量科学研究院、中国计量大学要加强其在计量科技基础及前沿技术研究方面的能力,在应对国际单位制重大技术革命的关键时期,建立一批面向未来产业的高准确度、高稳定性的量子计量基准,并加强新型量传溯源体系建设;企业要结合自身需求,不断提升计量测试技术的自主研发能力,与科研院所采取联合研发模式,探索计量测试技术、测试方法以及测试仪器向高、精、专方向发展的有效路径,并在此过程中形成官产学研相互促进、深度融合的正向反馈机制。

(3)积极发挥政府在工业计量服务中国智造中的引导作用。当前,我国尚没有在国家层面形成以计量科技发展来推动制造业转型升级的有效方案或机制。这就要求政府积极发挥引导作用,建立完善的体制机制,将具体任务层层落实;制造业之间以产业链为基础形成错综复杂、相辅相成的网络关系,在一个产业中,会涉及多项计量测试技术,同样,一项测试技术也会贯穿整个产业。因此,政府需要引导各类资源集聚,协调各级计量机构,对产业中相关计量测试技术进行研究,找出它们的相关性,挖掘产业关键共性技术,促进产业规模的叠加、产业集群的形成;企业的高附加值、高综合效率、低能耗都是以基于精准的计量测试数据为前提的,因此还需要借助工业互联网发展契机,加强工业计量数据归集挖掘、分析研究及管理应用,并在国家层面构建工业计量供需对接平台,不断畅通工业计量创新成果和市场需求精准对接的机制与路径。

参考文献

- [1]黄群慧.实施产业基础再造工程,打造一批先进制造业集群[N].北京:经济日报,2020-01-21.
- [2]中国社会科学院工业经济研究所课题组.提升产业链供应链现代化水平路径研究[J].北京:中国工业经济,2021,(2):80-97.
- [3]黄群慧,倪红福.基于价值链理论的产业基础能力与产业链水平提升研究[J].成都:经济体制改革,2020,(5):11-21.
- [4]芮明杰.构建现代产业体系战略思路、目标与路径[J].北京:中国工业经济,2018,(9):24-40.
- [5]中国工程院工业强基战略研究项目组.工业强基战略研究(卷I)[M].北京:电子工业出版社,2017.

- [6]王舒卉,金辉,肖天雷.智能制造时代下的标准化与计量[J].北京:仪器仪表标准化与计量,2018,(5):1-3.
- [7]李少壮,张泽光,李洪波,张学涛,李伟.从“工业4.0”看工业计量的未来[J].北京:计测技术,2015,(6):1-5,53.
- [8]刘琦楠,刘佳音,孔祥浩.我国航空发动机产业基础创新现状及产业水平提升建议——基于专利计量视角[J].广州:科技管理研究,2023,(17):148-156.
- [9]Chirkov, A.P. Assessment of the Impact of Metrology on the Economy: New Methodology[J]. Measurement Techniques, 2020, 63, (8):66-72.
- [10]薛兴昌.工业计量的作用和特点[J].北京:工业计量,2006,(16):3-4.
- [11]Kocafe, Y., D.Kocafe, and D.Bhattacharyay. Quality Control via Electrical Resistivity Measurement of Industrial Anodes[J]. Light Metals, 2015, 15, (2):1097-1102.
- [12]叶声华,秦树人.现代测试计量技术及仪器的发展[J].成都:中国测试,2009,(35):1-6.
- [13]黄松涛.大数据时代的计量服务[J].北京:中国计量,2018,(1):30-32,95.
- [14]Giacone, E. and S.Manco. Energy Efficiency Measurement in Industrial Processes[J]. Energy, 2012, 38, (1):331-345.
- [15]梁治中.浅谈工业计量与企业标准化[J].太原:大众标准化,2013,(1):62-63.
- [16]尚晓丽,白鑫.计量检测技术现状及其对策[J].北京:企业改革与管理,2014,(24):190.
- [17]朱崇全,周迎春.产业计量与产业经济[J].北京:现代测量与实验室管理,2011,(1):59-61.
- [18]Filho, B.R. and R.F.Goncalves. Legal Metrology, The Economy and Society: A Systematic Literature Review[J]. Measurement, 2015, 69, (6):155-163.
- [19]刘奕,夏杰长,李焱.生产性服务业集聚与制造业升级[J].北京:中国工业经济,2017,(7):24-42.
- [20]Humphrey, J., and H.Schmitz. How Does Insertion in Global Value Chains Affect Upgrading in Industrial Clusters[J]. Regional Studies, 2002, 36, (9):1017-1027.
- [21]Giuliani, E., C.Pietrobelli, and R.Rabellotti. Upgrading in Global Value Chains: Lessons from Latin American Clusters[J]. World Development, 2005, 33, (4):549-573.
- [22]阳立高,龚世豪,王铂,晁自胜.人力资本、技术进步与制造业升级[J].北京:中国软科学,2018,(1):138-148.
- [23]陈建刚,朱崇全.产业计量的本质及其意义解析[J].北京:中国计量,2015,(2):37-40.
- [24]Mitra, A. Fundamentals of Quality Control and Improvement[M]. John Wiley & Sons, 2016.
- [25]舒建立.谈计量管理与产品质量的关系[J].北京:工业计量,1998,(5):2.
- [26]Anderson, J. Determining Manufacturing Costs[J]. Chemical Engineering Progress, 2009, 105, (1):27-31.
- [27]方向.求精准 度万物 量天地 衡公平——浅析计量的基础作用[N].北京:中国质量报,2015-10-28.
- [28]Lee, A.S. Integrating Positivist and Interpretive Approaches to Organizational Research[J]. Organization Science, 1991, 2, (4):342-365.
- [29]张近乐,赵娟.中国航空航天制造业科技创新能力环境影响因素研究——基于结构方程模型的路径分析[J].北京理工大学学报(社会科学版),2014,(3):100-106.
- [30]张雪梅,陈浩,杨秀平.基于SEM的工业企业生态创新动力机制研究——来自兰州市的调查数据[J].广州:科技管理研究,2016,(18):251-256.
- [31]Powell, T. C. Total Quality Management as Competitive Advantage: A Review and Empirical Study[J]. Strategic Management Journal, 1995, 16, (1):15-37.
- [32]陈强远,林思彤,张醒.中国技术创新激励政策:激励了数量还是质量[J].北京:中国工业经济,2020,(4):79-96.
- [33]Wheaton, B., B.Muthen, D.F.Alwin, and G.F.Summers. Assessing Reliability and Stability in Panel Models[J]. Sociological Methodology, 1977, 8, (1):84-136.
- [34]井润田,孙璇.实证主义 vs. 诠释主义:两种经典案例研究范式的比较与启示[J].北京:管理世界,2021,(3):198-216,13.
- [35]Yin, R.K. Case Study Research: Design and Methods. 4th edition[M]. London, UK: SAGE Publications, 2009.
- [36]Eisenhardt, K.M. Building Theories From Case Study Research[J]. Academy of Management Review, 1989, 14, (4):532-550.
- [37]Miles, M.B., and A.M.Huberman. Qualitative Data Analysis[M]. Thousand Oaks, CA: Sage, 1994.
- [38]Glaser, B., and A.Strauss. The Discovery of Grounded Theory[M]. Chicago: Aldine, 1967.

Impact of Industrial Metrology on Manufacturing Upgrading: Examination based on Three Dimensions of Quality, Cost and Technological Innovation

SHAO Jing-ting¹, HUANG Qun-hui², LI Fang-fang³

(1. Institute of Industrial Economics of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing, 100006, China;

2. Institute of Economics of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing, 100836, China;

3. The School of Economics and Management of Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract: Metrology is one of the five important elements of industrial technology infrastructure in the “four foundations” of industry, and is an important component of the improvement of industrial basic capabilities. Under the background of the current era of quantization in the current metrology development, it is of extraordinary significance to deeply interpret the impact mechanism of industrial metrology on the upgrading of manufacturing industry and conduct practical tests on it, in order to accelerate the construction of a modern industrial system.

This paper innovatively examines the importance of the improvement of industrial basic capabilities, represented by industrial metrology, for the upgrading of manufacturing industries from an economic perspective. It constructs a micro and macro theoretical framework of the impact of industrial metrology on the upgrading of the manufacturing industry, and introduces the corresponding research hypotheses. Then, a combination of empirical and interpretive analysis methods is used to conduct a practical test. Firstly, based on a questionnaire survey of the manufacturing enterprises from multiple industries and various regions in China, 400 survey data are obtained, and a structural equation model is constructed based on the survey. The research hypotheses were quantitatively tested. To overcome the drawback that the research data comes from only the micro level enterprises and cannot test the impact mechanism of industrial metrology on the upgrading of manufacturing industry from the macro level, this paper further selects two typical representative enterprises in the field of industrial metrology (one is the leading company of the industry and the other is the company that sets the industry standard) to conduct case studies. On the one hand, the structural equation model constructed by the quantitative research institute is tested qualitatively, and on the other hand, the impact of industrial metrology on the upgrading of the manufacturing industry can also be verified from the macro level.

The research results indicate that: at the micro level, industrial metrology can positively affect the economic benefits of enterprises through the improvement of product quality and the reduction of production costs. At the same time, industrial metrology can also directly affect the technological innovation of enterprises, and the technological innovation of enterprises will further affect economic benefits by affecting product quality and production costs, and promote the upgrading of the manufacturing industry with higher added value and higher comprehensive efficiency; At the macro level, industrial metrology can lead the technological progress of the manufacturing industry and produce a positive feedback effect on the measurement activities of enterprises at the micro level, forming a multiple and circular influence mechanism of industrial metrology on the upgrading of the manufacturing industry.

From a theoretical perspective, this study provides an economic theoretical basis for revealing the mechanism by which industrial metrology promotes the upgrading of the manufacturing industry. It innovatively explores the economic value of industrial metrology, a traditional concept in the field of engineering, and constructs measurable economic indicators for it, which is the first time in both the field of industrial metrology and economics; From a practical perspective, as China's economy enters a new stage of high-quality development, the construction of a modern industrial system driven by the enhancement of industrial basic capabilities becomes an urgent practical problem that needs to be solved. This study explores the upgrading path of China's manufacturing industry by taking industrial metrology as the entry point, which provides a direction for thinking in response to the above questions. Especially in the current time point that industrial metrology enters into the era of quantum metrology, the transformation of technological paradigms provides a rare opportunity for China to win the strategic advantage of development in the new round of technology and industry competition. It is of great significance to fully leverage the supporting and guiding role of industrial metrology in China's intelligent manufacturing development.

Key Words: industrial metrology; manufacturing upgrading; product quality; production cost; technological innovation

JEL Classification: L60, L78, O14, O25

DOI: 10.19616/j.cnki.bmj.2024.11.005

(责任编辑: 闫梅)