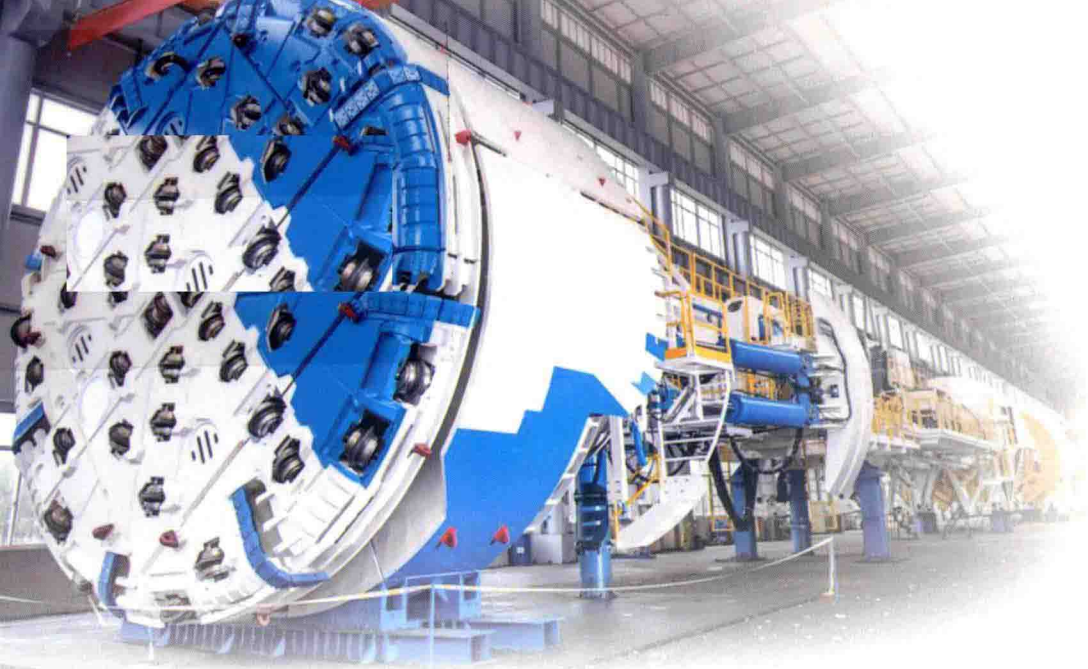




抽水蓄能电站

CHOU SHUI XUN ENG DIAN ZHAN

TBM SHI GONG JI SHU

TBM 施工技术

李富春 吴朝月 主 编

徐艳群 尚海龙 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

抽水蓄能电站

CHOU SHUI XUNENG DIAN ZHAN

TBM SHI GONG JI SHU

TBM 施工技术

李富春 吴朝月 主 编

徐艳群 尚海龙 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

近 10 年国内 TBM 设计制造及施工技术取得了长足发展, TBM 作为隧洞开挖的先进施工设备已广泛应用于水利、矿山、铁路、市政交通等领域。

本书根据目前 TBM 设备的发展和应用状况以及抽水蓄能电站隧洞施工现状, 以文登抽水蓄能电站为例, 提出了抽水蓄能电站引水压力管道斜井和地下厂房布置设计及施工中应用 TBM 施工技术的具体方案和关键技术问题, 并进行了全面的方案对比研究, 分析了 TBM 施工技术应用的可行性和经济性, 总结了抽水蓄能电站 TBM 施工技术应用研究的成果, 可为国内待建工程提供参考。

本书适用于从事 TBM 施工技术和管理人员使用, 其他施工技术人员可参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

抽水蓄能电站 TBM 施工技术 / 李富春, 吴朝月主编. —北京: 中国电力出版社, 2018.10
ISBN 978-7-5198-2349-8

I. ①抽… II. ①李… ②吴… III. ①抽水蓄能水电站—工程施工 IV. ①TV743

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 196853 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 杨伟国 孙建英 (010-63412369)

责任校对: 黄 蓓 李 楠

装帧设计: 左 铭

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018 年 10 月第一版

印 次: 2018 年 10 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 11.5

字 数: 160 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 90.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编 委 会

主 编 李富春 吴朝月

副 主 编 徐艳群 尚海龙

编写人员 张正平 何少云 衣传宝 葛志娟

刘传军 李前廷 张栋梁 刘 纳



前言

党的十八大以来，我国对生态文明做出了理论分析和政策指导，要求在各项工作中要全面准确贯彻落实新发展理念，坚定不移贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念。为此，2016年3月，国网新源山东文登抽水蓄能有限公司针对国内抽水蓄能电站地下洞室开挖以钻爆法为主的施工现状提出，可依托山东文登抽水蓄能电站对TBM自动掘进技术应用进行研究。研究的主要成果如下：

（1）对我国TBM设计制造企业进行了实地调研，充分了解了国内TBM设计制造的水平；对国内目前开工建设的TBM施工现场进行了调研，了解了应用TBM施工技术的隧洞作业面的施工及管理情况。

我国TBM设计制造企业通过近10年的努力，经历设备引进、组装制造、联合设计、创新发展等发展阶段，目前已经掌握了核心技术，并能自主设计制造，为国内工程建设大规模应用创造了条件。

国内施工企业已经拥有了庞大的TBM专业施工团队，形成了一系列专业的管理制度，为隧洞高效、快速施工提供了技术保障。

工程建设主体单位，对于TBM施工单位的管理、结算积累了丰富的应用经验，TBM施工简化了工程建设主体单位的管理流程和人员机构，实现了现

代化管理；TBM 施工技术自身安全程度提高，从技术上做到了施工过程的本质安全，降低了工程建设主体单位的安全风险管控难度。

（2）通过对工程应用实例的分析，对 TBM 施工关键技术有了充分了解。TBM 施工技术作为目前最为先进的隧洞施工技术，具有安全环保、劳动力需要量少、自动化程度高、工作强度低、施工速度快、进度保证率高的优点。但对于工程前期的勘察设计工作要求较高，工程地质条件是决定应用 TBM 施工技术的控制因素，对于不同的工程项目需要结合项目自身工程条件量身定做 TBM，并对施工过程中可能出现的问题做好预案和措施。

（3）依托文登抽水蓄能电站，根据工程建设条件，联合 TBM 设计制造企业，针对文登抽水蓄能电站开展 TBM 施工技术的应用研究。

通过对文登抽水蓄能电站拟定的交通洞和通风洞施工方案技术经济比较分析，与常规钻爆法施工交通洞和通风洞相比，TBM 施工可明显缩短工程建设工期，并随着 TBM 设备重复利用率的提高，其总投资与采用常规施工方案相比增加不大。

通过对斜井 TBM 的应用分析，TBM 作为长斜井（400m 以上）施工的设备，具有斜井偏斜率控制精确、劳动力需要量小、安全保障性高、施工速度快等优点，在抽水蓄能电站长斜井（400m 以上）施工中应用技术上可行；小直径斜井 TBM 可适应不同项目的斜井导洞施工，可重复使用，具备推广可行性。

通过对 TBM 在抽水蓄能电站施工中的应用研究，可以实现 TBM 在抽水蓄能电站交通洞、通风洞以及引水斜井施工中的应用，可较大幅度的提高抽水蓄能电站施工的先进性；通过对整个工程施工方案的技术经济性比较分析，与常规施工方案相比，采用 TBM 施工方案后，工程建设总工期减少（约 6 个月），虽然工程总投资增加较多，但 TBM 施工技术具有的安全环保优势符合我国工程建设绿色施工的要求，在抽水蓄能电站整体施工中具有一定优势。

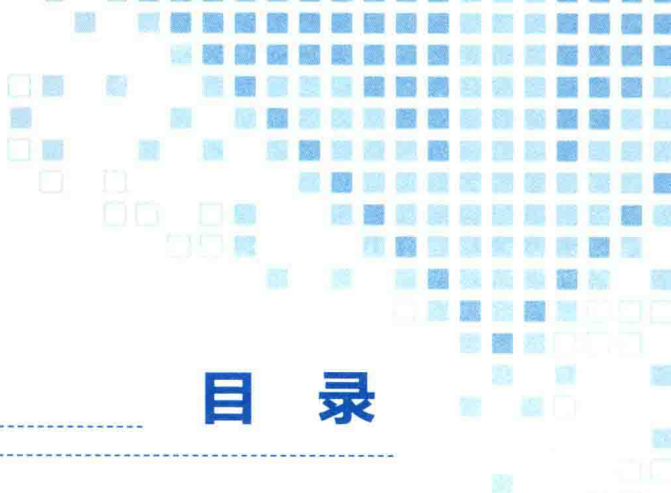
党的十八大以来国家对环境保护制定了严格的法律法规，要求全社会形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式、生活方式。TBM施工技术作为替代目前抽水蓄能电站钻爆施工技术的先进施工手段，具备了充分的应用条件，TBM施工技术的应用将促进提高国内抽水蓄能行业的整体管理水平。

为提高国内抽水蓄能电站隧洞开挖的安全性，促进抽水蓄能电站建设绿色施工，国网新源山东文登抽水蓄能有限公司组织中国电建北京勘测设计研究院有限公司将以上成果总结提炼形成本书内容。本书由李富春、吴朝月担任主编；徐艳群、尚海龙担任副主编。李富春、徐艳群、吴朝月编写了第1章、第2章；徐艳群、尚海龙编写了第3章、第4章；吴朝月、尚海龙编写了第5章；吴朝月、尚海龙、刘传军、李前廷、张栋梁、葛志娟、刘纳等编写了第6章；李富春、张正平、何少云、衣传宝、吴朝月、徐艳群、尚海龙编写了第7章。

因本书作者水平有限，书中难免存在不少疏漏，恳请广大读者谅解并提出宝贵意见。

编 者

2018年9月



目 录

前言

第 1 章 概述	1
第 2 章 抽水蓄能电站建设先进施工技术应用的必要性	3
2.1 TBM 设备及施工技术发展的需要	3
2.2 社会条件变化的要求	6
2.3 工程建设管理的需要	9
第 3 章 抽水蓄能电站先进洞挖设备	11
3.1 先进洞挖设备	11
3.2 TBM	16
3.3 盾构机	25
3.4 TBM 与盾构机	28

第 4 章 TBM 应用实例..... 30

4.1 斜井 TBM 应用实例..... 30

4.2 平洞 TBM 应用实例..... 32

4.3 小转弯半径掘进设备应用实例..... 44

第 5 章 TBM 施工关键技术问题及一般分析方法..... 46

5.1 平洞 TBM 掘进方法..... 46

5.2 斜井 TBM 掘进方法..... 47

5.3 TBM 施工技术应用关键问题及分析方法..... 47

第 6 章 文登抽水蓄能电站 TBM 应用研究..... 53

6.1 工程条件..... 53

6.2 TBM 施工技术在抽水蓄能电站施工中的适用性分析..... 73

6.3 通风洞和交通洞 TBM 施工技术研究..... 80

6.4 斜井 TBM 施工技术研究..... 135

6.5 TBM 施工技术在抽水蓄能电站施工中的应用探讨..... 155

6.6 TBM 与钻爆法的经济性结论分析..... 168

第 7 章 研究成果及建议..... 170

7.1 研究成果..... 170

7.2 应用建议..... 171

参考文献..... 173



第1章

概 述

受水电施工企业经营管理模式的制约，水电行业施工技术科技进步推动较慢，涉及行业整体性科研项目较少；随着常规水电项目的减少，抽水蓄能电站核准开工项目数量加大，对抽水蓄能电站施工关键技术设备应用研究是非常必要的。

国内抽水蓄能电站隧洞平洞开挖普遍采用“钻爆法”，斜井竖井开挖普遍采用“爬罐法”或者“反井钻法”施工，上述施工方法一直存在安全隐患多、施工工期长、劳动力投入大、作业环境差，施工效率低，对资源消耗和环境影响大的问题，但目前国内抽水蓄能电站的建设中还没有出现新的技术手段改变这一现状。

作者针对国内在抽水蓄能电站还没有与全断面隧道掘进机相关的应用和研究现状，并结合抽水蓄能电站明挖、洞挖先进施工技术应用研究，依托山东文登抽水蓄能电站对 TBM 自动掘进技术在平洞、引水斜井施工中的应用方案进行应用研究。

抽水蓄能电站地下厂房通风洞和交通洞施工均采用“钻爆法”施工，钻爆法施工组织简单容易，但开挖进度较慢（实际月最大开挖进度不超过 150m/月），施工安全风险大，特别是在追求最大开挖进尺时施工作业面环境极差，对现场施工和管理的人员职业健康会造成很大的伤害。以往，因为通风洞交通洞为控制蓄能电站建设工期的关键项目，所以在工程施工管理过程中很容

易因为进度而忽视施工安全和作业人员的劳动职业健康，所以也容易引发劳动安全事故。为此通过对自动掘进技术的应用研究将实现作业人员的施工安全和职业健康保障最高，作业环境最优，进度最快，最终实现工程建设期的整体效益最高。

此外国内已建和在建的抽水蓄能电站中，斜井或竖井开挖主要采用先开挖导井再二次扩挖的施工方法；其中长斜井的开挖又受开挖设备的限制，对于超过 400m 的斜井需要采取增加施工支洞将长斜井变成短斜井并采取爬罐或反井钻进行斜井开挖。随着近 10 年来我国 TBM 的发展，应用于长斜井中的 TBM 在国内重型装备制造企业中也有了一定的技术储备，但在国内抽水蓄能电站斜井开挖中还没有应用的先例，通过对 TBM 在抽水蓄能电站引水斜井施工中的应用研究，可为以后斜井的设计和施工方案提供技术支持，有利于优化设计和施工方案，保证工程施工安全、质量及进度，并为国内抽水蓄能电站的建设管理提供经验。

TBM 掘进技术在抽水蓄能电站中的应用研究将推动 TBM 设备在国内工程领域的应用范围，并提高国内抽水蓄能电站建设的安全性和先进性，为国内抽水蓄能电站的设计、施工和建设管理注入新的理念，引领抽水蓄能电站的建设管理方向，并将给国内抽水蓄能电站的建设带来巨大效益。

目前国内大部分抽水蓄能电站的建设均由国网控股有限公司（以下简称新源公司）管理，本次研究的成果在新源公司范围内的推广应用将直接影响国内大部分待建抽水蓄能电站项目的建设，进一步提升新源公司项目的建设管理水平，并可为新源公司系统内其他工程提供参考依据，提高类似项目的整体效益。



第 2 章

抽水蓄能电站建设先进施工技术应用的必要性

2.1 TBM 设备及施工技术发展的需要

自 1985 年我国从美国罗宾斯公司 (Robbins) 引进了直径为 10.8m 掘进机以来,我国硬岩 TBM 的应用及隧道施工技术的发展正在各工程领域内迅猛提升,自 20 世纪 80 年代引进硬岩 TBM 至今的 TBM 应用分类见表 2-1。通过对我国 TBM 的分类统计,可以看出我国 TBM 的发展由国外承包商和制造商在中国承担 TBM 工程,到我国自主施工阶段,再到联合设计制造和自主施工阶段,正在朝着自主研发和自主施工、整机再制造的全产业链发展阶段迈进。

特别是近年来我国的 TBM 设备还出口海外(中铁工程装备集团有限公司设计制造的护盾式 TBM 已出口国外用于黎巴嫩大贝鲁特供水隧道),施工队伍也在国外承担 TBM 工程(如中国电力建设集团有限公司承建的厄瓜多尔水电站项目)。

目前我国 TBM 设计制造及施工技术创新积累的步伐大大加快,同时还逐步形成了由国家有关部门牵头,以工程为背景,国内施工企业、大型机械制造企业与高等院校联合攻关研发的 TBM 产业发展之路。与此同时世界著名 TBM 制造商与国内制造企业也联合制造 TBM 并取得了很大进展。未来中国将成为 TBM 制造业和 TBM 施工工程的主战场。

表 2-1 我国 TBM 应用分类统计表

年代	TBM 工程分类	TBM 工程名称	开挖直径 (m)	隧洞长 (km)	TBM 工程数量	发展阶段特点
1985~2001	引水隧洞	广西天生桥水电工程	10.8	7.5	3	以国外 TBM 制造商和承包商为主
		引大入秦工程	5.53	17.0		
		引黄入晋工程	4.82~4.94	121.8		
1997~2002	铁路隧道	西康线秦岭隧道	8.8	18	3	建立起自主的 TBM 施工队伍
		西安—南京线磨沟岭隧道	8.8	5.0		
		西安—南京线桃花铺 1 号隧道	8.8	6.2		
2003~2010	引水隧洞	辽宁大伙房水库输水工程	8.03	85	10	进入联合设计制造、自主施工的大发展阶段
		新疆八十一大坂引水隧洞工程	6.67	30.68		
		青海引大济湟工程	5.93	24.17		
		甘肃引洮工程	5.75	35.5		
		锦屏 II 级电站引水隧洞工程	12.4	2×16		
		那邦水电站引水隧洞工程	4.5	9.8		
		陕西引红济石工程	3.7	12		
	铁路隧道	南疆铁路中天山隧道	8.8	22.5		
		兰渝铁路西秦岭隧道	10.2	2×28.2		
	地铁	重庆轨道交通 6 号线 TBM 试验段工程	6.36	2×12.2		
2010~至今	引水隧洞	吉林省中部城市引松供水工程	7.93	20.198+19.797	2	自主研发和自主施工、整机再制造的全产业链发展阶段
		兰州市水源地建设项目	5.49	24.65	2	
		新疆 ABH 输水隧洞	6.53	18+16.8	2	
		“引故入洛”引水工程	5.00	6.64	1	
	铁路隧道	大瑞铁路高黎贡山铁路隧道	9.03	12.8	1	

先进的施工设备带动了先进的施工技术发展,根据国内不同时期应用的施工设备情况分析,我国隧洞开挖工程技术发展,其大概经历了四个阶段(见图2-1),第一代(20世纪四五十年代)主要靠钢钎大锤人工撬挖;第二代(20世纪六七十年代)主要靠手风钻人工钻爆施工;第三代(20世纪八九十年代)主要靠凿岩台车机械钻爆施工;第四代(2000年至今)TBM自动掘进逐渐开始作为隧洞开挖的主要手段。



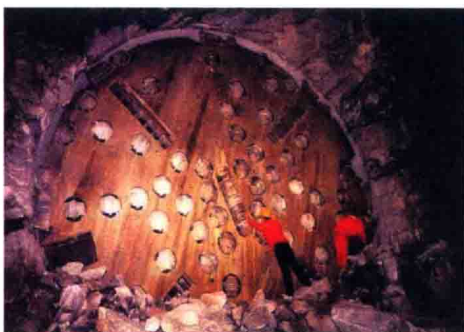
(a)



(b)



(c)



(d)

图2-1 国内不同时期应用的施工设备
(a) 第一代 钢钎大锤撬挖; (b) 第二代 手风钻钻爆;
(c) 第三代 凿岩台车; (d) 第四代 TBM自动掘进

从我国隧洞开挖施工技术的不同阶段来看,先进的开挖设备必将推动先进的隧洞开挖技术普及应用。目前TBM是最为先进的掘进设备,其设计、制造加工技术已经被我国掌握,其施工技术已经在水利、水电、交通领域推广普及,在抽水蓄能电站施工中也具备条件,对TBM在抽水蓄能电站中的应用研究很有必要。

2.2 社会条件变化的要求

钻爆法在 20 世纪六七十年代的社会环境下具有施工组织简单容易、对劳动力知识水平要求不高、便于普及应用的特点，而且在当时也是一种先进的施工设备，很快得到了推广应用。随着社会的进步，钻爆法施工的缺点则表现得较为突出，特别是其开挖进度较慢，施工安全风险大，施工作业面环境极差，对现场施工和管理的人员职业健康会造成很大的伤害等这一系列缺点，已经成为工程建设的制约因素。

从环境保护和劳动安全要求以及我国劳动力结构的变化来看，推动 TBM 在抽水蓄能电站的应用也是我国社会环境发展的必然要求。

2.2.1 环境保护的要求

绿水青山就是金山银山。党的十八大以来，从山水林田湖草的“命运共同体”初具规模，到绿色发展理念融入生产生活，再到经济发展与生态改善实现良性互动，以习近平同志为核心的党中央将生态文明建设推向新高度。从保护到修复，着力补齐生态短板，党的十八大将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局，“美丽中国”成为中华民族追求的新目标。树立保护生态环境就是保护生产力、改善生态环境就是发展生产力的理念。

2015 年 4 月，中共中央、国务院印发《关于加快推进生态文明建设的意见》，明确了生态文明建设的总体要求、目标愿景、重点任务、制度体系。同年 9 月，《生态文明体制改革总体方案》出台，提出健全自然资源资产产权制度、建立国土空间开发保护制度、完善生态文明绩效评价考核和责任追究制度等制度。

生态环保法制建设不断健全。《大气污染防治行动计划》《水污染防治行

行动计划》《土壤污染防治行动计划》陆续出台，被称为“史上最严”的新环保法从2015年开始实施，在打击环境违法犯罪方面力度空前。

生态环保执法监管力度空前。压减燃煤、淘汰黄标车、整治排放不达标企业，启动大气污染防治强化督查等一系列的环保重拳出击，带来更多蓝天碧水。

绿色发展理念已经深入人心，在绿色发展理念指引下，需要在工程建设过程中推动先进的施工设备应用替代现有高污染的施工设备。

2.2.2 劳动安全的要求

劳动安全，又称职业安全，是劳动者享有的在职业劳动中人身安全获得保障、免受职业伤害的权利。近年来，我国经济高速增长，取得了世人瞩目的成就。但是，在经济快速增长的背后却付出了巨大的社会成本，如生态环境恶化、自然资源枯竭等，其中也包括越来越严重的劳动安全问题。随着各类生产安全事故频繁发生，安全生产形势极为严峻。目前，我国劳动安全问题主要集中在工矿生产领域，尤其是众多的煤炭生产企业更是劳动安全事故的多发地带。无论是瓦斯爆炸、透水事故还是矿井坍塌的发生，除了其中人为违规操作的因素外，多数是由于安全生产投入不足造成的。劳动过程中的复杂性，决定了劳动设备、劳动条件也具有复杂性。由于各行各业的生产特点和工艺过程有所不同，需要解决的劳动安全技术问题也有所不同。

因此，国家针对不同的劳动设备和条件以及不同行业的生产特点，规定了适合各行业的安全技术规程。主要有《工厂安全卫生规程》《建筑安装工程安全技术规程》《矿山安全条例》《矿山生产法》《乡镇煤矿安全生产若干暂行规定》《起重机械安全规程》《剪切机械安全技术规程》《磨削机械安全规程》《压力机的安全安置技术条件》《木工机械安全装置技术条件》《煤气安全规程》《橡胶工业静电安全规程》《工业企业厂内运输生产规程》《爆破安全规程》等。《劳动法》第六章“劳动安全卫生”对安全技术规程也作了原则规定。

法律责任设定的直接意图在于促使人们遵守规则。事实证明，只在灾难发生后追究有关人员的责任，无法起到应有的警示和预防作用。对那些安全生产违法行为，安全责任不落实、事故隐患不整改的企业法人代表，应增加其民事赔偿责任，实施高额罚款，甚至使其倾家荡产。对负有安全生产监督管理职责的部门工作人员，玩忽职守铸成大错的，给予降级或者撤职处分，构成犯罪的，依法追究刑事责任。通过修改相关法律，加大惩处力度，增加责任人的违规成本，才能使得这些法规真正起到威慑作用。

目前劳动安全已备受各方关注，工程建设领域除加强建立、健全安全生产责任制；建立、健全安全管理机构；加强安全教育和技术培训外，采用先进的生产设备，也是提高安全保障的有效途径。先进的生产设备可以降低安全事故的发生概率，并提高劳动作业人员的安全保护能力，降低工程管理者管理风险，从而推动工程建设的顺利进行。

2.2.3 劳动力变化的要求

随着我国人口总量的增长变化，特别是劳动年龄人口数量和质量的“双变”已经对我国各行各业的升级转型形成倒逼之势。其中劳动力供给的减少导致人工成本上升、产业转移和技术替代劳动力成为未来的趋势。我国 15~59 岁劳动年龄人口 2011 年的时候达到峰值（9.25 亿人），2012 年比 2011 年减少 345 万，这是劳动年龄人口的首次下降。2012 年开始逐年下降，2013 年减少 244 万，2014 年减少 371 万，2015 年减少 487 万。人社部发布的数据显示，2015 年我国劳动年龄人口下降至 9.11 亿，还会持续下降，而且到 2030 年以后将会出现大幅下降的过程，平均以每年 760 万人的速度减少。到 2050 年，人社部预测劳动年龄人口会由 2030 年的 8.3 亿降到 7 亿左右。

同时劳动力年龄结构和知识结构都无法再支持过去传统行业所需的人力资源。近年来出现的“民工荒”背后是 15~24 岁青年劳动力的大幅下降。据统计 15~24 岁青年劳动力是劳动年龄人口下降最明显的群体，2006 年这个群