

证券研究报告 / 行业深度报告

脑科行业深度：服务端护城河高，科技端想象空间大

报告摘要：

脑科行业规模近 1200 亿元，医疗服务价格有望提升。脑科主要疾病包括脑血管病、神经系统疾病、颅脑损伤与脑肿瘤。脑血管病行业规模约 760 亿元，五年 CAGR 约 10%；神经系统疾病行业规模约 250 亿元，五年 CAGR 约 8%，两者发病人数均随老龄化持续增长。脑科行业近年来主要受 DRG/DIP 支付方式改革、医疗服务价格改革政策影响。脑科医疗服务价格调整已在试点城市率先落地，调整项目全部为三四级手术，平均上调幅度达 17-59%。公立医院在脑科医疗中占据绝对主导地位，地区间脑科医疗供给差异大，民营脑科连锁因门槛较高而相对稀缺。

脑科连锁是高壁垒的医疗服务赛道。三博脑科 2017-2022 年营收 CAGR 约 6%，销售药品收入占比逐年下降。医疗服务成本中人工成本与直接材料为主要项目，且较其他医疗服务行业处于较高水平，期间费用以管理费用为主。公司拥有一支技术水平高、数量稳健增长的医师团队。北京三博是处于成熟期的头部脑专科医院，2026 年起搬入新院区有望打开增长空间。其收入以住院与神经外科为主，医疗服务毛利率相对较高。医院床位利用已接近饱和，医生团队实力雄厚，医疗设备投入大。福建三博是处于爬坡期的区域脑专科医院，收入与利润率有望持续提升。其收入同样以住院与神经外科为主，神经内科与销售药品收入相对较高。受床位开放比例与利用率较低影响，医院房租折旧成本较高影响毛利率。

脑机接口技术高速发展，未来应用场景广阔。脑机智能的实现依赖于大脑和机器之间的信息交互。脑电生理信号是脑机智能系统中最常用的信号类型，从信号采集角度可分为侵入式、非侵入式、半侵入式三类。非侵入式脑机接口由于安全无创得到了广泛研究与产业应用，但受限于信号强度与噪声干扰，目前可实现的交互性能有限。脑机接口关键技术包括采集技术、刺激技术、范式编码技术、解码算法技术、外设技术和系统化技术。脑机接口研究可追溯到 1970 年代，近五十年的发展经历了科学幻想阶段、科学论证阶段和技术爆发阶段。我国《“十三五”国家科技创新规划》中将“脑科学与类脑研究”列入科技创新 2030 重大项目。美国在脑机接口的理论、方法和实践方面具有明显的领先优势。Neuralink 已对侵入式脑机接口技术进行了首次人体临床试验。神经调控属于广义脑机接口范畴，上一代以脑起搏器为代表的神经调控技术发展已日臻成熟。脑机接口市场投融资普遍处于早期阶段。

风险提示：医保相关政策风险，医院爬坡进度不及预期，外延扩张不及预期，研发进展与应用落地不及预期，竞争加剧风险。

优于大势

上次评级: 优于大势

历史收益率曲线



涨跌幅 (%)	1M	3M	12M
绝对收益	-6%	-6%	-19%
相对收益	-5%	3%	2%

行业数据

成分股数量 (只)	473
总市值 (亿)	61826
流通市值 (亿)	29463
市盈率 (倍)	32.47
市净率 (倍)	2.61
成分股总营收 (亿)	23361
成分股总净利润 (亿)	1882
成分股资产负债率 (%)	41.84

相关报告

《医药行业深度报告：关注刚性需求医药消费场景》

--20240115

《医药行业深度报告：技术革新推动临床价值的关键之年》

--20240115

证券分析师：刘宇腾

执业证书编号：S0550521080003
010-63210890 liuyt@nesc.cn

研究助理：高皓天

执业证书编号：S0550122070065
18217383557 gaoht@nesc.cn

目 录

1. 脑科行业：行业规模近 1200 亿元，医疗服务价格有望提升	5
1.1. 脑科疾病与行业规模：2021 年行业规模近 1200 亿元，增速近 10%	5
1.1.1. 脑血管病：2021 年行业规模 760 亿，随老龄化持续增长	5
1.1.2. 神经系统疾病：2021 年行业规模 250 亿，随老龄化持续增长	7
1.1.3. 脑损伤：2021 年行业规模 130 亿，客单价平稳增长	8
1.1.4. 脑肿瘤：2021 年行业规模约 35 亿，渗透率有较大提升空间	10
1.2. 脑科行业政策：医疗服务价格有望提升，利好行业发展	12
1.3. 脑科行业竞争格局：公立医院占绝对主导，地区间差异大	16
2. 脑科连锁：高壁垒的医疗服务赛道，以三博脑科为例	19
2.1. 公司整体财务分析：收入稳健增长，医疗服务成本较高	19
2.2. 北京三博医院经营分析：医生产值较高，经营效率较高	23
2.3. 福建三博医院经营分析：爬坡期较长，提升空间较大	27
3. 脑机接口：机器与生物智能交互，临床落地近在咫尺	31
3.1. 脑机接口概念	31
3.2. 脑机接口技术及分类：非植入式无创技术受关注	32
3.3. 脑机接口的关键技术及发展历史	34
3.3.1. 脑机接口的关键技术	34
3.3.2. 发展历程：三大阶段及脑机接口行业促进政策	39
3.3.3. 脑机接口海内外政策与“一体两翼”战略布局	41
3.4. 脑机接口国内外研究及应用进展	44
3.4.1. Neuralink	44
3.4.2. 脑虎科技	45
3.4.3. BCI 的多领域科研进展	46
3.5. 脑机接口产业链	48
3.6. 脑机接口与神经调控 BDS	49
3.6.1. 脑深部电刺激与神经电刺激的概念和基本原理	49
3.6.2. 脑深部电刺激的作用机制	51
3.6.3. 脑深部电刺激与运动障碍病	52
3.6.4. 脑深部电刺激与原发性震颤	53
3.6.5. 脑深部电刺激与肌张力障碍	53
3.6.6. 脑深部电刺激与其他功能性脑病	53
3.7. 脑机接口相关产品分类及应用场景	54
3.8. 脑机接口一二级市场投融资情况	56
3.8.1. 国内脑机接口投融资情况	56
3.8.2. 创新医疗子公司：杭州博灵	56

图表目录

图 1: 脑科行业规模 (亿元)	5
图 2: 脑血管病主要类型	6
图 3: 脑血管病患者年龄	6
图 4: 脑血管病行业规模 (亿元)	6
图 5: 神经系统疾病主要类型	7
图 6: 神经系统疾病患者年龄	7
图 7: 神经系统疾病行业规模 (亿元)	8
图 8: 脑损伤患者年龄	9
图 9: 脑损伤行业规模 (亿元)	9
图 10: 脑肿瘤主要类型	10
图 11: 恶性脑肿瘤患者年龄	10
图 12: 脑肿瘤行业规模 (亿元)	11
图 13: 脑科医疗服务价格上调项目数	14
图 14: 脑科医疗服务价格上调比例	15
图 15: 脑科医疗服务价格上调项目覆盖病种	15
图 16: Top50 神经外科医院地区分布	17
图 17: Top100 神经外科医院地区分布	17
图 18: 三博脑科营业收入 (亿元) 及增速	19
图 19: 三博脑科销售药品收入 (亿元) 及毛利率	20
图 20: 三博脑科医疗服务收入 (亿元) 及增速	20
图 21: 三博脑科医疗服务成本结构	21
图 22: 三博脑科期间费用结构	21
图 23: 三博脑科医生职称分布	22
图 24: 2021 年三博脑科住院患者结构 (按人均开支)	22
图 25: 2021 年三博脑科住院收入结构 (按人均开支)	22
图 26: 北京三博收入 (亿元) 及毛利率	23
图 27: 2021 年北京三博收入结构 (按门诊住院)	24
图 28: 2021 年北京三博各业务毛利率	24
图 29: 2021 年北京三博住院收入结构 (按科室)	24
图 30: 2021 年北京三博门诊收入结构 (按科室)	24
图 31: 北京三博医疗服务成本结构	25
图 32: 北京三博手术台数、住院人次与床位利用率	25
图 33: 北京三博人均手术量、人均创收 (万元) 与医师数	26
图 34: 北京三博大型医疗设备投入 (万元)	26
图 35: 福建三博收入 (亿元) 及毛利率	27
图 36: 2021 年福建三博收入结构 (按门诊住院)	28
图 37: 2021 年福建三博各业务毛利率	28
图 38: 2021 年福建三博住院收入结构 (按科室)	28
图 39: 2021 年福建三博门诊收入结构 (按科室)	28

图 40: 福建三博医疗服务成本结构	29
图 41: 福建三博手术台数、住院人次与床位利用率	29
图 42: 福建三博人均手术量、人均创收 (万元) 与医师数	30
图 43: 福建三博医保收入 (亿元)	30
图 44: 脑机接口系统框架——脑机信息交互	32
图 45: 脑电技术手段及波段示意图	32
图 46: BCI 传感器安装类型——有创 (IM)、半创 (ECoG) 和无创 (MEG、EEG、fNIRS)	32
图 47: 脑机智能的实现方案	33
图 48: 脑机接口关键技术	34
图 49: 国外脑机接口发展阶段	39
图 50: 全球脑机接口市场及发展方向规模 (亿美元)	41
图 51: 我国“一体两翼”战略布局	43
图 52: 脑机接口国内外研究成果	45
图 53: 脑机接口国内外研究成果	46
图 54: 脑机接口国内外研究成果	47
图 55: 脑机接口国内外研究成果	48
图 56: 脑机接口产业链示意图	49
图 57: DBS 发展历程图	50
图 58: 脑深部电刺激 (DBS) 装置系统组成	50
图 59: 基底节的直接与间接解剖通路	50
图 60: 脑机接口融资笔数结构	56
图 61: 脑机接口融资轮次分布	56
图 62: 博灵脑机 (杭州) 科技有限公司股权结构	57
 表 1: 脑科行业近年来国家层面相关政策	13
表 2: 头部神经专科医院概况	16
表 3: 头部民营神经专科连锁概况	18
表 4: 中美脑机接口相关政策	42
表 5: 脑机接口产品分类	55

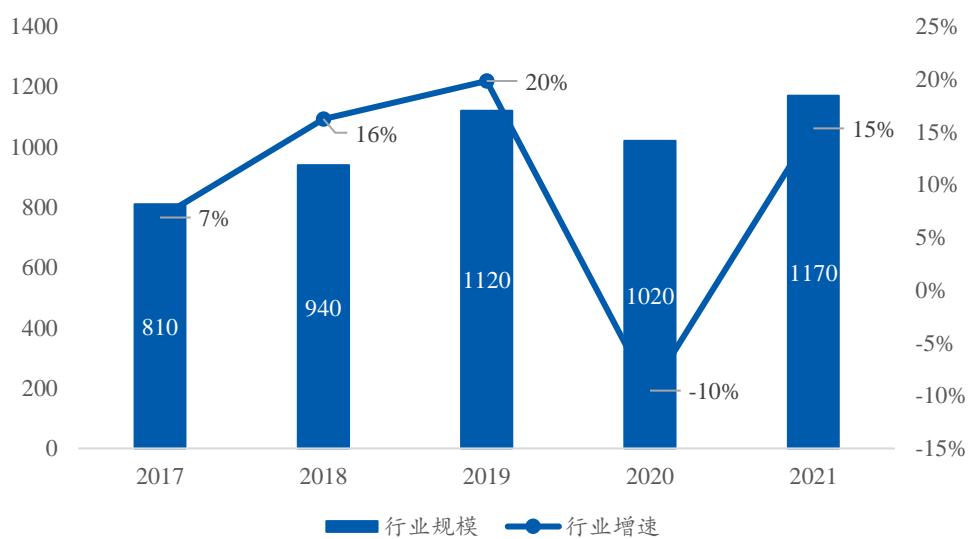
1. 脑科行业：行业规模近 1200 亿元，医疗服务价格有望提升

脑科主要疾病包括脑血管病、神经系统疾病、颅脑损伤与脑肿瘤。脑血管病行业规模约 760 亿元，五年 CAGR 约 10%，发病人数将随老龄化持续增长，多采用就近手术/介入治疗。神经系统疾病行业规模约 250 亿元，五年 CAGR 为 8%，发病人数将随老龄化持续增长，多采用药物治疗/择期手术治疗。脑损伤行业规模约 130 亿元，五年 CAGR 为 6%，多采用就近治疗。脑肿瘤行业规模约 35 亿元，五年 CAGR 为 17%，渗透率有较大提升空间，多采用择期手术治疗/放疗化疗。脑科行业近年来主要受 DRG/DIP 支付方式改革、医疗服务价格改革政策影响。脑科医疗由于技术难度大、劳务价值高，是医疗服务价格调整的优先对象。脑科医疗服务价格调整已在试点城市率先落地，调整项目全部为三四级手术，平均上调幅度达 17-59%。公立医院在脑科医疗中占据绝对主导地位，地区间脑科医疗供给差异大。

1.1. 脑科疾病与行业规模：2021 年行业规模近 1200 亿元，增速近 10%

脑科（神经专科）可分为神经外科与神经内科，是研究治疗脑、脊髓和周围神经系统疾病的科室。脑科治疗的主要疾病包括脑血管病、神经系统疾病、颅脑损伤与脑肿瘤，此外还治疗脊髓脊柱疾病、小儿神经疾病等。以下对脑科治疗的四大类疾病及其行业规模进行详细分析。

图 1：脑科行业规模（亿元）



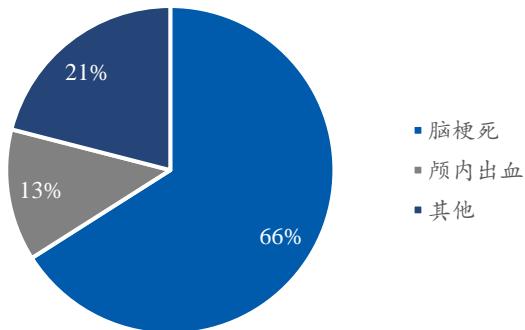
数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

1.1.1. 脑血管病：2021 年行业规模 760 亿，随老龄化持续增长

脑血管病是最常见的脑科疾病，具有发病率高、复发率高、死亡率高、致残率高的特点。脑血管病是指脑血管病变引起脑功能障碍的疾病，其发病影响因素包括高血脂、高血压、糖尿病、房颤等心脏疾病、颈动脉狭窄、动脉粥样硬化等疾病，也包括吸烟、饮酒、肥胖、饮食不合理、运动不足等不良生活习惯。脑血管病症状可表现为肢体偏瘫、口角歪斜、言语意识障碍、头痛、呕吐等，并可迅速危及生命。2021 年我国城市居民脑血管病死亡率达 14 人/万人，占全部疾病死亡约 22%，仅次于心

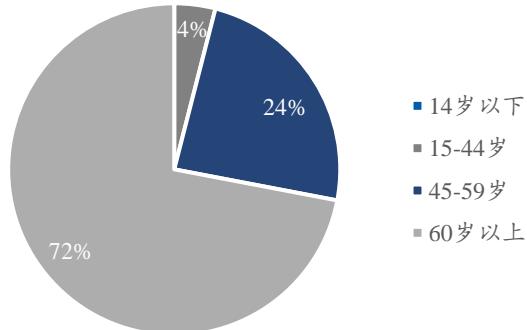
心脏病与恶性肿瘤；农村居民脑血管病死亡率达 17.6 人/万人，占全部疾病死亡约 24%，仅次于心脏病。

图 2：脑血管病主要类型



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

图 3：脑血管病患者年龄

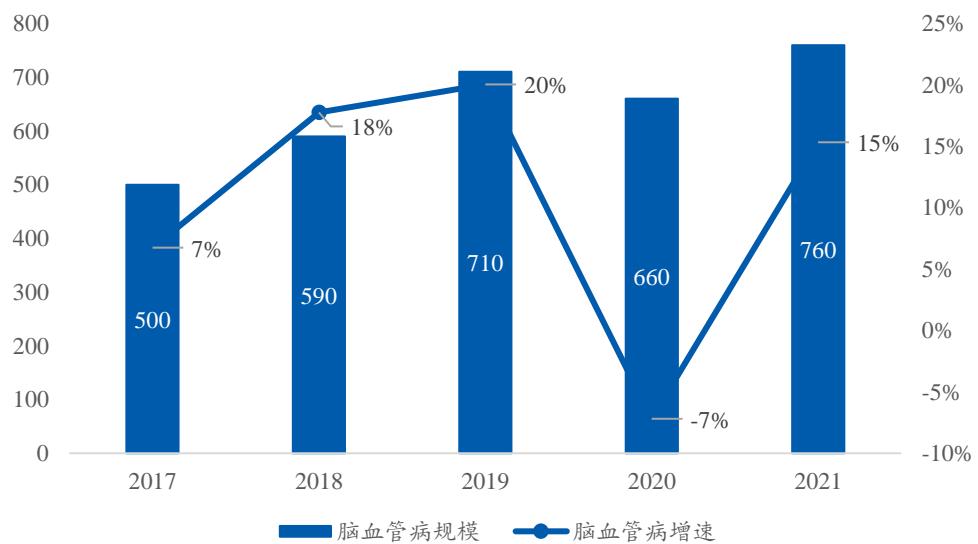


数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

脑卒中约占全部脑血管病的 80%。脑卒中又可进一步分为缺血性脑卒中（脑梗死）与出血性脑卒中（颅内出血），其中缺血性脑卒中占脑卒中的 80-85%，其余为出血性脑卒中。出血性脑卒中的死亡率与治疗费用均明显高于缺血性脑卒中。

脑血管病发病与患者年龄强相关，我国老龄化程度加深将推动发病率持续上升。脑血管病患者中年龄在 44 岁及以下的仅占 4%，而 60 岁及以上的占比高达 72%，发病与年龄强相关。随着我国 60 岁以上人口占比由 2021 年的 19% 提升至 2030 年的 25%（《国家人口发展规划（2016-2030 年）》）或更高，我国脑血管病的标化发病率将持续上升。

图 4：脑血管病行业规模（亿元）



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

脑血管病 2021 年行业规模约 760 亿元，2016-2021 年 CAGR 为 10%。2021 年我国

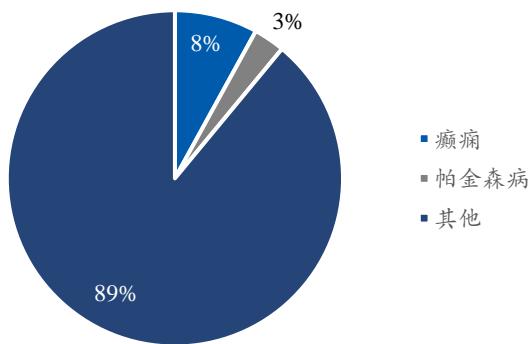
脑血管病出院 575 万人次，2016-2021 年 CAGR 约 4%；次均医药费用 1.32 万元，2016-2021 年 CAGR 约 6%；平均住院天数约 10.5 天。根据《中国心血管健康与疾病报告》，我国 2019 年脑卒中新发患者约 394 万人，我们估计全部脑血管病新发患者约 490 万人。考虑到脑卒中的 1 年内复发率达 17%，2 年内复发率达 25%，我国脑血管病治疗率已达到较高水平。我们预期脑血管病行业规模未来年增长率将保持在 10% 以上。

脑血管病较多采用就近治疗，治疗方式主要包括开颅手术治疗、神经介入治疗、药物治疗。由于脑血管病大部分为急性（如脑卒中），故就近治疗较多，仅早筛早诊发现的症状平和的脑血管病患者可以考虑异地治疗。治疗方式上，神经介入在国外已成为脑血管病的主流治疗方式，其在疗效、安全性等方面对比开颅手术均具有一定优势。但在我国由于神经介入耗材价格显著高于医护手术费，导致患者进行神经介入手术的医疗支出显著高于开颅手术。神经介入在国内推广仍需要一定时间，但头部医院的介入治疗率也可达 60% 以上。开颅手术为传统治疗方式，而药物治疗一般与前两者配合，仅可单独治疗轻型脑血管病患者。

1.1.2. 神经系统疾病：2021 年行业规模 250 亿，随老龄化持续增长

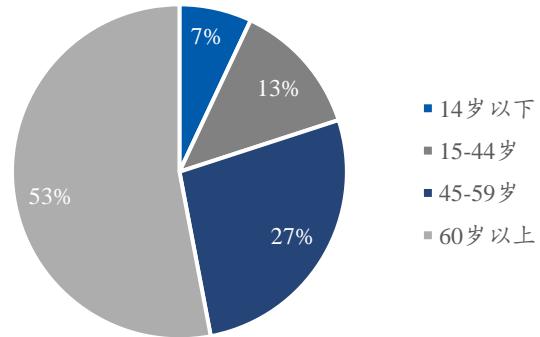
神经系统疾病是第二大类脑科疾病。神经系统疾病主要包括癫痫、帕金森病、三叉神经痛、面肌痉挛、幻肢痛、肌张力障碍、中枢神经系统炎性疾病等。其内部病种结构较为分散，最大病种癫痫占比仅约 8%。2021 年我国城市居民神经系统疾病死亡率为 0.9 人/万人，占全部疾病死亡约 1.5%，排主要疾病致死率第 8；农村居民神经系统死亡率为 1 人/万人，占全部疾病死亡约 1.4%，排主要疾病致死率第 8。

图 5：神经系统疾病主要类型



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

图 6：神经系统疾病患者年龄



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

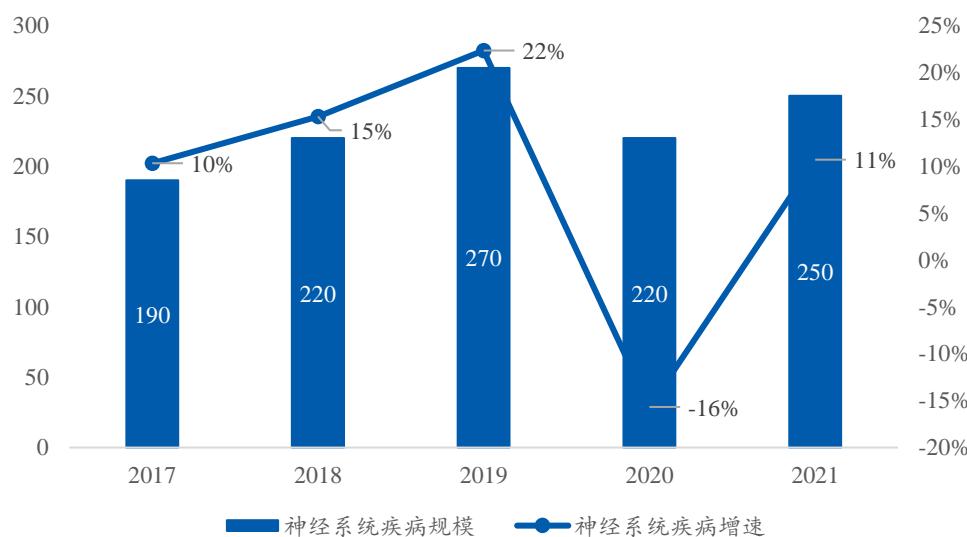
癫痫是一种慢性脑部疾病，具有反复性和短暂性的特点。根据流行病学调查估计，全国癫痫患者数超 800 万人，每年新发患者数超 40 万人。原发性癫痫的诱发因素以遗传为主，遗传率约 3-5%；继发性癫痫则可由皮质发育障碍、脑肿瘤、脑外伤、中枢神经系统感染、脑血管疾病等引发。癫痫发作时症状可包括意识丧失、四肢抽搐、四肢僵硬、肌肉松弛、身体不自主活动等。

帕金森病又称“震颤麻痹”，是一种老年神经退行性疾病，全国患者数约 300 万人。

帕金森病的主要病因为衰老带来的神经系统老化，遗传因素也有一定影响。帕金森病症状包括静止性震颤、肌强直、运动迟缓、姿势平衡障碍、感觉障碍、睡眠障碍、精神障碍等。

神经系统疾病发病与患者年龄有较强相关性，我国老龄化程度加深对发病率上升有一定推动作用。脑血管病患者中年龄在 44 岁及以下的占 20%，而 60 岁及以上的占比为 53%，老龄患者占比高于主要疾病平均水平。随着我国 60 岁以上人口占比由 2021 年的 19% 提升至 2030 年的 25%（《国家人口发展规划（2016-2030 年）》）或更高，我国神经系统疾病患病人群将持续增长。

图 7：神经系统疾病行业规模（亿元）



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

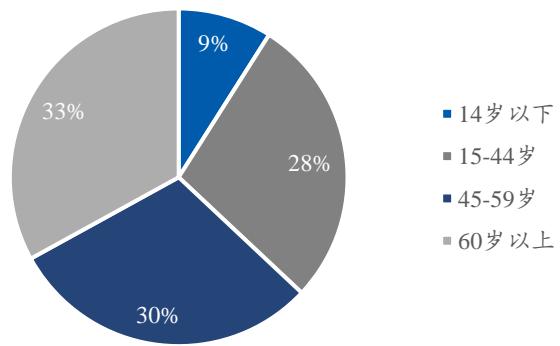
神经系统疾病 2021 年行业规模约 250 亿元，2016-2021 年 CAGR 为 8%。2021 年我国神经系统疾病出院 260 万人次，2016-2021 年 CAGR 约 3%；次均医药费用 0.95 万元，2016-2021 年 CAGR 约 5%；平均住院天数约 9 天。我们预期神经系统疾病行业规模未来年增长率近 10%。

神经系统疾病以药物治疗为主，外科治疗一般为择期治疗。神经系统疾病一般 70% 以上采用药物治疗，以控制症状为核心，仅在药物治疗无效（自始无效或长期服药致使药效明显减退）时考虑外科治疗。外科治疗方式包括电极植入、伽马刀、开颅手术、神经介入等。由于神经系统疾病一般为非急性，且需外科治疗时难度较高，患者多前往头部医院寻求治疗。

1.1.3. 脑损伤：2021 年行业规模 130 亿，客单价平稳增长

脑损伤是第三大类脑科疾病。脑损伤是指由于外力作用于头部造成的脑组织器质性损伤，主要由交通事故、工伤事故、高处坠落、打架斗殴等引起。其症状可表现为脑震荡（短暂的意识障碍）、脑挫裂伤（与伤灶相应的神经功能障碍）、颅内血肿（剧烈头痛、喷射样呕吐等）。

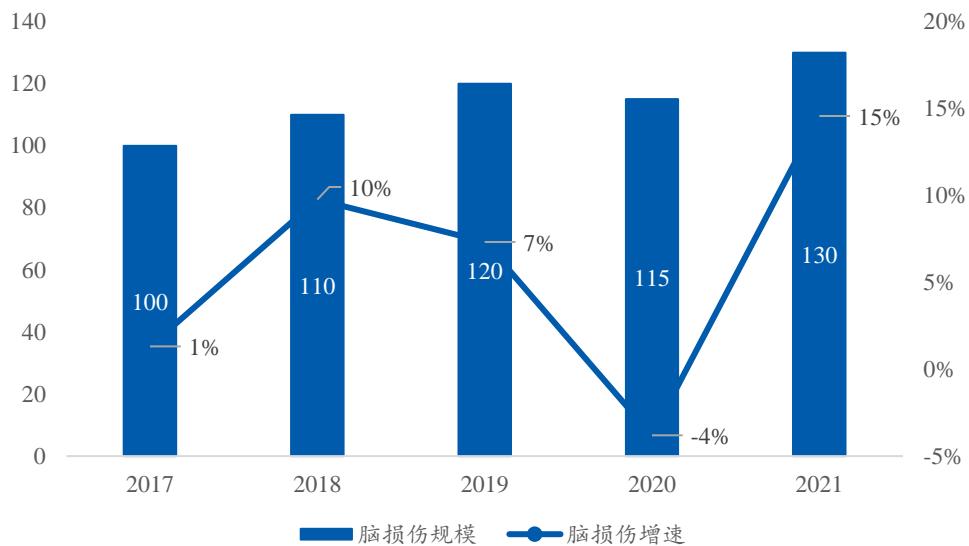
图 8：脑损伤患者年龄



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

脑损伤发病与患者年龄相关性较弱，预期未来年发病人数较为稳定。脑损伤患者中年龄在 44 岁及以下的占 37%，60 岁及以上的占 33%。由于脑损伤主要由各类事故引起，其与年龄相关性较弱，年新发患者数将较为稳定。

图 9：脑损伤行业规模（亿元）



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

脑损伤 2021 年行业规模约 130 亿元，2016-2021 年 CAGR 为 6%。2021 年我国脑损伤出院 79 万人次，2016-2021 年 CAGR 约-2%；次均医药费用 1.65 万元，2016-2021 年 CAGR 约 8%；平均住院天数约 11.5 天。脑损伤中 80% 以上为颅内损伤。行业主要增长因素为次均医药费用的上升，预期未来脑损伤行业规模年增速约 5%。

脑损伤多采用就近治疗，治疗方式包括外科手术与药物治疗。由于脑损伤一般由各类事故引发，大部分为急性，主要采取就近治疗的方式。外科手术包括对开放性脑损伤使用清创缝合术，对有颅内血肿的闭合性脑损伤使用开颅血肿清除术、去骨瓣减压术等。病情较轻的脑损伤患者可只使用药物治疗。

1.1.4. 脑肿瘤：2021年行业规模约35亿，渗透率有较大提升空间

脑肿瘤是第四大类脑科疾病，治疗难度普遍较高，死亡率高。脑肿瘤是指发生于颅腔内的神经系统肿瘤，其已知发病影响因素较少，主要包括电离辐射、病毒感染、神经系统致癌物等。脑肿瘤症状可表现为头痛与喷射状呕吐（由颅内压增高引起）、神经功能缺损（由脑肿瘤刺激、压迫、破坏脑神经引起）、癫痫（伴发性）等。2021年我国城市居民脑恶性肿瘤死亡率为0.37人/万人，占全部疾病死亡约0.6%；农村居民神经系统死亡率为0.43人/万人，占全部疾病死亡约0.6%。考虑到脑恶性肿瘤发病率远低于其他脑科疾病，其死亡率处于脑科疾病中最高水平。

图 10：脑肿瘤主要类型

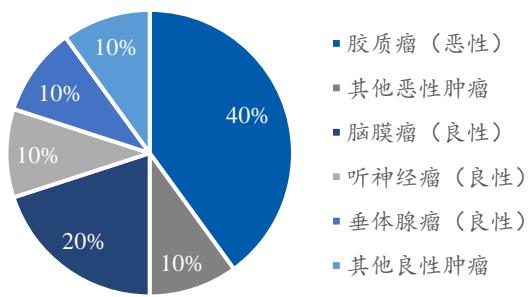
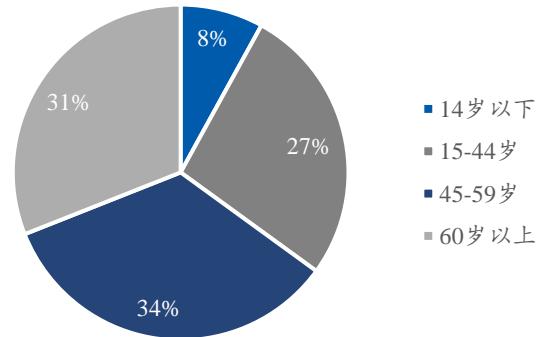


图 11：恶性脑肿瘤患者年龄



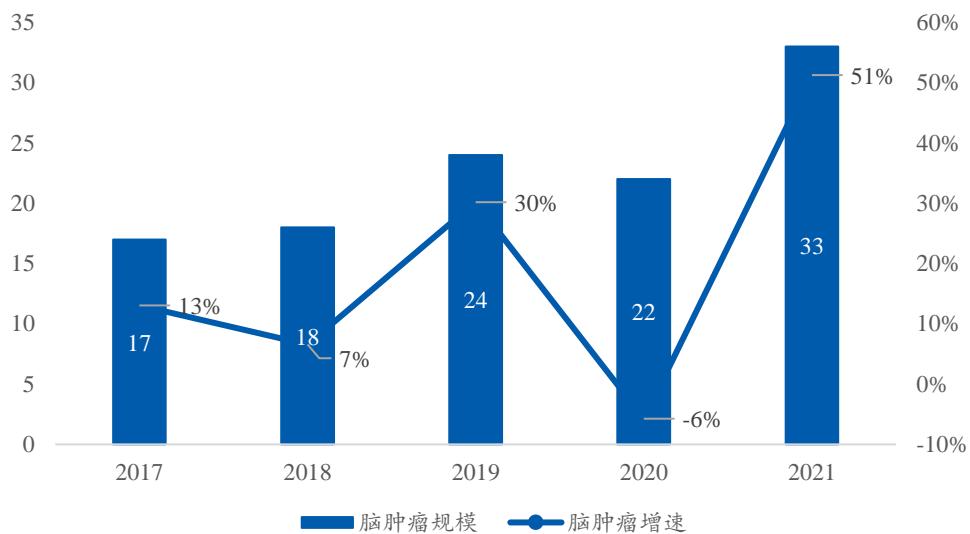
数据来源：百度健康医典，东北证券

数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

脑肿瘤中恶性肿瘤约占一半，恶性肿瘤以胶质瘤为主。胶质瘤是最常见的神经上皮组织肿瘤，约占脑恶性肿瘤的80%，其复发风险高、治愈难度大，发病年龄多在20-50岁间，以30-40岁为高峰。脑膜瘤是起源于脑膜及其间质衍生物的良性肿瘤，约占脑良性肿瘤的40%，其生长较慢、病程较长，多以头痛、癫痫为首发症状。听神经瘤大部分起源于前庭神经施旺细胞，约占脑良性肿瘤的20%，病程进展缓慢，多以单侧听力下降、高频耳鸣、耳闭塞、眩晕、头晕为首发症状。垂体腺瘤是起源于垂体前叶腺垂体细胞的良性肿瘤，约占脑良性肿瘤的20%，生长较慢，可引起内分泌异常。

脑肿瘤发病与老龄化相关性较弱，但治疗渗透率有较大提升空间。脑肿瘤患者中年龄在44岁及以下的占35%，60岁及以上的占31%。由于脑肿瘤高发于中年而非老年人群，我国老龄化趋势对脑肿瘤发病人数影响有限。根据《脑胶质瘤诊疗指南（2022版）》，我国脑胶质瘤年发病率为0.5-0.8人/万人，据此推算我国每年脑恶性肿瘤新发人数约11.5万人，而《中国卫生健康统计年鉴》公布的2021年公立医院恶性脑肿瘤出院人数仅3.1万人，渗透率不足30%，有较大提升空间。

图 12: 脑肿瘤行业规模 (亿元)



数据来源：中国卫生健康统计年鉴，东北证券

脑肿瘤 2021 年行业规模约 35 亿元，2016-2021 年 CAGR 为 17%。2021 年我国恶性脑肿瘤出院 3.1 万人次，2016-2021 年 CAGR 约 4%；次均医药费用 5.36 万元，2016-2021 年 CAGR 约 13%；平均住院天数约 16 天。脑恶性肿瘤的次均医药费用与平均住院天数远高于其他脑科疾病。我们预期脑肿瘤行业规模未来年增长率将保持在 15%以上。

脑肿瘤较多采用择期治疗，治疗方式主要包括开颅手术治疗、放疗化疗、药物治疗等。由于脑肿瘤大部分为非急性且治疗难度大，患者大多前往头部脑科医院寻求治疗。对于良性肿瘤，进行手术全部切除最为有效，症状较小时也可以采取保守治疗（放疗、化疗、药物等）。对于恶性肿瘤，一般采用最大安全切除结合放疗化疗的方式，以延缓复发、延长生存期为目标。

1.2. 脑科行业政策：医疗服务价格有望提升，利好行业发展

脑科行业近年来主要受 DRG/DIP 支付方式改革、医疗服务价格改革政策影响。脑科作为典型的严肃医疗，其收入结构中医保占比较高，故医保支付方式改革对行业影响较大。同时脑科医疗服务难度系数大，技术劳务价值高，也是医疗服务价格调整的优先对象。此外，民营脑科医院还受国家关于社会办医的政策影响。

DRG/DIP 支付方式改革要求医院注重内涵建设与精细化管理。 DRG (Diagnosis Related Groups, 疾病诊断相关分组) 支付是指按疾病诊断将病例细分到不同的组，每一个组采用统一的收费价格由患者与医保进行支付。DIP 支付 (Diagnosis-Intervention Packet, 按病种分值付费) 是指对临床病例的“疾病诊断-治疗方式”组合逐一进行定价收费。在医保改革前按项目付费的政策下，医院倾向于粗放式、规模扩张式运营，因为医院收益可以来源于医疗项目的增加。在 DRG/DIP 支付改革后，医保支付更接近“预付制”，即医保对每个入院患者的支付金额较为确定。医院为患者进行的医疗服务转变为医院的“成本”。因此，政策要求医院更注重内涵式发展、注重成本控制、注重体现医疗服务技术价值。

DRG/DIP 支付方式改革自 2022 年开始全面推广，预计至 2025 年末完成全面覆盖，为脑科行业的发展带来了机遇与挑战。 根据 2021 年 11 月国家医保局发布的《DRG/DIP 支付方式改革三年行动计划》，到 2025 年底 DRG/DIP 支付方式将覆盖所有符合条件的开展住院服务的医疗机构，基本实现病种、医保基金全覆盖。该政策同时对每年的改革落实进度（按地区、医疗机构、病种、医保基金）做了详细要求。由于 DRG/DIP 付费额与医院的 CMI 值 (Case-Mix Index, 病例组合指数) 直接相关，高技术水平的医院能够通过收治高治疗难度的患者来获得更多的医保支付。同时 DRG/DIP 付费实施“结余留用，超支不补/分摊”，医疗效率更高，成本控制更好的医院将具有明显的竞争优势。此外，不合理的医技检查、药品使用、耗材使用、激励导向等也将导致医院出现“治疗越多，亏损越大”的不利情况。

民营脑科医院长期受社会办医政策支持。 2019 年 6 月国家卫健委等十部门发布《关于促进社会办医持续健康规范发展的意见》，在医院规划、医联体、医保等多方面支持社会办医。政策提出“各地在新增或调整医疗卫生资源时，要首先考虑由社会力量举办或运营有关医疗机构”、“政府对社会办医区域总量和空间布局不作规划限制”、“社会办医可以选择加入（医联体），综合力量或者专科服务能力较强的社会办医可牵头组建医联体”、“扩大社会办医纳入医保定点的覆盖面，社会办医正式运营 3 个月后即可提出定点申请，定点评估完成时限不得超过 3 个月时间”。2022 年 5 月国务院办公厅发布《深化医药卫生体制改革 2022 年重点工作任务》，再次强调“支持社会办医持续健康规范发展，支持社会办医疗机构牵头组建或参加医疗联合体”。

表 1：脑科行业近年来国家层面相关政策

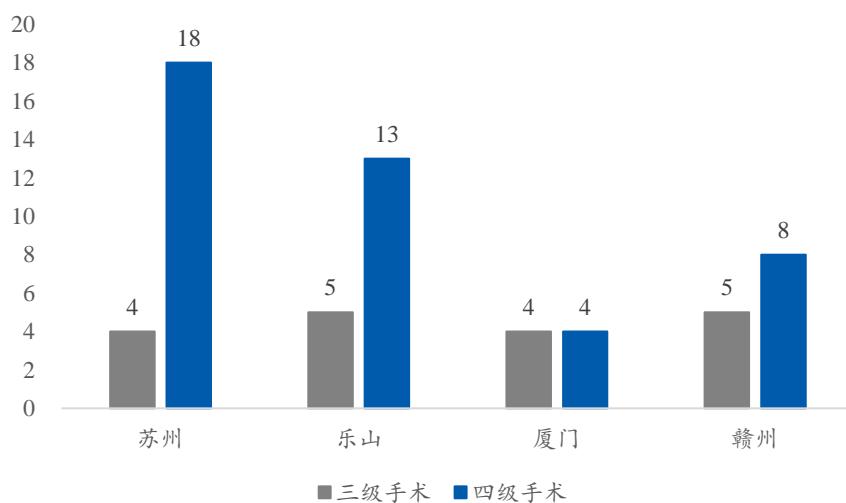
时间	政策	部门	政策内容
2022-7	《关于进一步做好医疗服务价格管理工作的通知》	国家医保局	突出体现对技术劳务价值的支持力度。 充分听取医疗机构和医务人员的专业性意见建议，优先从治疗类、手术类和中医类中遴选价格长期未调整、技术劳务价值为主（价格构成中技术劳务部分占比 60% 以上）的价格项目纳入价格调整范围，每次价格调整方案中技术劳务价值为主的项目数量和金额原则上占总量的 60% 以上， 客观反映技术劳务价值，防止被设备物耗虚高价格捆绑。 对技术难度大、风险程度高、确有必要开展的医疗服务项目，可适当体现价格差异。
2022-5	《深化医药卫生体制改革 2022 年重点工作任务》	国务院办公厅	增强市县级医疗服务能力。每个省份在 2—3 个设区的市开展紧密型城市医疗集团试点，完善体制机制，实行网格化布局和规范化管理。 支持社会办医持续健康规范发展，支持社会办医疗机构牵头组建或参加医疗联合体。 深入推广三明医改经验。加大三明医改经验推广力度；开展药品耗材集中带量采购工作；推进医疗服务价格改革；推进医保支付方式改革；深化公立医院人事薪酬制度改革；加强综合监管。
2021-11	《DRG/DIP 支付方式改革三年行动计划》	国家医保局	到 2024 年底，全国所有统筹地区全部开展 DRG/DIP 付费方式改革工作，先期启动试点地区不断巩固改革成果； 到 2025 年底，DRG/DIP 支付方式覆盖所有符合条件的开展住院服务的医疗机构，基本实现病种、医保基金全覆盖。 完善核心要素管理与调整机制。突出病组（病种）、权重（分值）和系数三个核心要素，建立完善管理和动态调整机制，并不断完善各项技术标准和流程规范。健全绩效管理与运行监测机制。加强医保基金使用效率效果评价考核，不断提高有限医保基金使用绩效。
2021-8	《深化医疗服务价格改革试点方案》	国家卫健委 国家医保局等八部门	建立更可持续的价格管理总量调控机制。 加强医疗服务价格宏观管理。合理确定价格调整总量。统筹平衡总量分配。 建立规范有序的价格分类形成机制。 通用型医疗服务的政府指导价围绕统一基准浮动。复杂型医疗服务的政府指导价引入公立医疗机构参与形成。特需服务和试行期内新增项目实行市场调节价。 建立灵敏有度的价格动态调整机制。 通用型医疗服务项目价格参照收入和价格指数动态调整。复杂型医疗服务项目价格经评估达标定期调整。建立医疗服务价格专项调整制度。
2019-6	《关于促进社会办医持续健康规范发展的意见》	国家卫健委等十部门	拓展社会办医空间。落实“十三五”期间医疗服务体系规划要求，严格控制公立医院数量和规模，为社会办医留足发展空间。 各地在新增或调整医疗卫生资源时，要首先考虑由社会力量举办或运营有关医疗机构。 进一步放宽规划限制。政府对社会办医区域总量和空间布局不作规划限制。乙类大型医用设备配置实行告知承诺制，取消床位规模要求。 发挥三级公立医院带动作用。各地要完善医联体网格化布局， 社会办医可以选择加入，综合力量或者专科服务能力较强的社会办医可牵头组建医联体，鼓励适度竞争。 支持公办和社会办医按照平等自愿原则组建专科联盟。

数据来源：各政府官网，东北证券

脑科医疗由于技术难度大、劳务价值高，是医疗服务价格调整的优先对象。2021年8月国家卫健委、医保局等八部门印发《深化医疗服务价格改革试点方案》，指出对复杂型医疗服务“允许历史价格偏低、医疗供给不足的薄弱学科项目价格优先调整，推动理顺比价关系”、“支持技术难度大、风险程度高、确有必要开展的医疗服务适当体现价格差异”。2022年7月国家医保局印发《关于进一步做好医疗服务价格管理工作的通知》，指出“突出体现对技术劳务价值的支持力度”、“优先从治疗类、手术类和中医类中遴选价格长期未调整、技术劳务价值为主（价格构成中技术劳务部分占比60%以上）的价格项目纳入价格调整范围，每次价格调整方案中技术劳务价值为主的项目数量和金额原则上占总量的60%以上”。

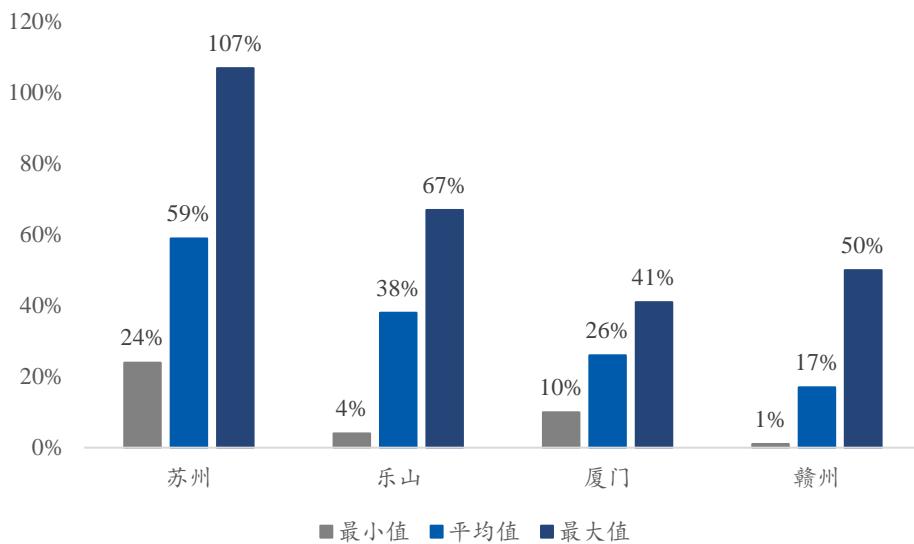
脑科医疗服务价格调整已在试点城市率先落地，调整项目全部为三四级手术。我国医疗服务价格改革试点城市为唐山、苏州、厦门、赣州、乐山。苏州上调脑科医疗服务项目22项，其中18项为四级手术；乐山上调脑科医疗服务项目18项（55小项），其中13项为四级手术；厦门上调脑科医疗服务项目8项（25小项），其中4项为四级手术；赣州上调脑科医疗服务项目13项，其中8项为四级手术。整体来看，四级手术占价格上调项目约70%。未来手术难度大的脑科医院更有机会从医疗服务项目提价中获益。

图 13：脑科医疗服务价格上调项目数



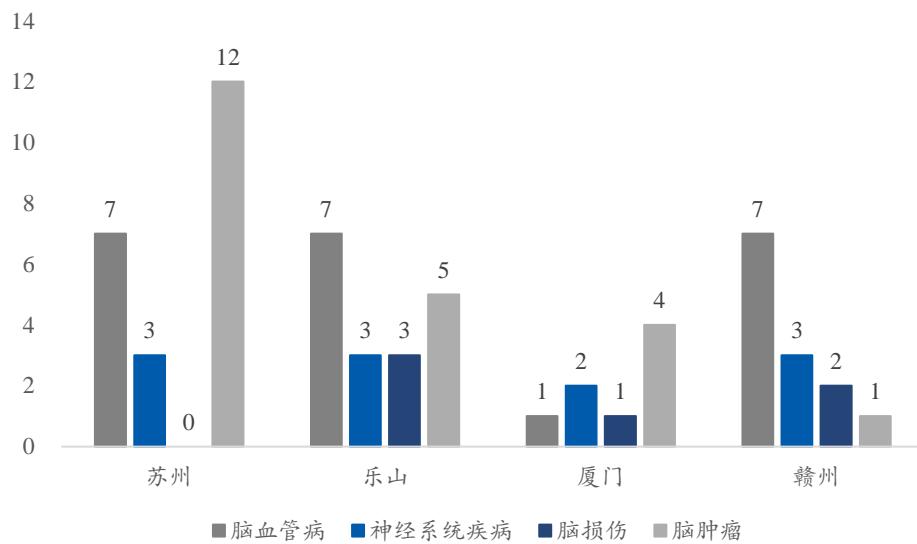
数据来源：各市医保局，东北证券

各地价格脑科医疗服务价格上调幅度不一，平均上调17-59%。苏州市平均上调幅度最高，达59%，上调幅度区间为24-107%。苏州市还新增了6项试用期自主定价的脑科医疗服务项目。乐山市平均上调幅度为38%，上调幅度区间为4-67%。乐山市下调了4项脑科检验项目的价格，平均降幅为14%。厦门市平均上调幅度为26%，上调幅度区间为10-41%。赣州市平均上调幅度为17%，上调幅度区间为1-50%。赣州市下调了7项脑科检验项目的价格，平均降幅为1%。若脑科医疗服务价格提升在全国范围内逐步推广，脑科医院的利润率/结余率有望显著提升。

图 14: 脑科医疗服务价格上调比例


数据来源：各市医保局，东北证券

上调项目适应症以脑血管病与脑肿瘤为主。苏州市、乐山市上调项目适应症中脑血管病与脑肿瘤显著多于神经系统疾病与脑损伤，厦门市上调项目适应症中脑肿瘤最多，赣州市上调项目适应症中脑血管病最多。脑肿瘤治疗难度在所有脑科疾病中最大，四级手术占比高。脑血管病患者基数较大，使用频率较高。

图 15: 脑科医疗服务价格上调项目覆盖病种


数据来源：各市医保局，东北证券

1.3. 脑科行业竞争格局：公立医院占绝对主导，地区间差异大

公立医院在脑科医疗服务供给中占据绝对主导地位。根据 2022 年度中国医院科技量值 (STEM) - 神经外科榜单，我国排名前 100 的神经外科医院中仅有北京三博脑科医院一家民营医院，其余全部为公立医院。脑科行业属于典型的高难度严肃医疗，由于头部公立医院在病例难度、导师水平、设备拨款等方面较民营医院具有显著优势，公立医院占绝对主导地位。

头部脑科医院在手术量、资深医生数等方面显著领先。天坛医院、华山医院年手术量可达 15000 台，近北京三博的 4 倍；而宣武医院、华西医院、浙大二院年手术量也为 8000-10000 台，约为北京三博的 2-2.5 倍。天坛医院神经专科副高以上医生数达 253 人，超北京三博的 4 倍；而宣武医院、华山医院、华西医院、浙大二院神经专科副高以上医生数为 90-160 人，约为北京三博的 1.5-2.5 倍。头部医院的单床产出水平相仿，普遍在每年每床 300 万元左右（含该医院的全部科室）。

表 2：头部神经专科医院概况

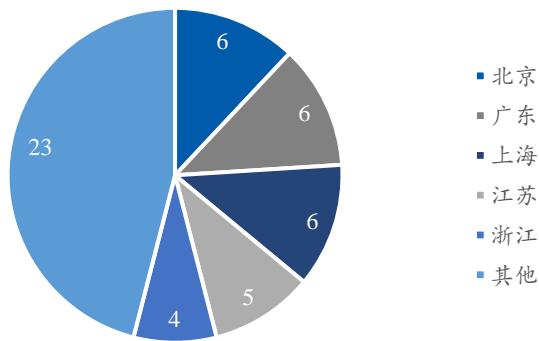
医院	所在地	床位数	年手术量	副高以上医生数	榜单排名
首都医科大学附属北京天坛医院	北京	560	~15000	253	1
首都医科大学宣武医院	北京	345	~10000	153	2
复旦大学附属华山医院	上海	600	~15000	135	3
四川大学华西医院	四川	420	~9000	93	4
浙江大学医学院附属第二医院	浙江	292	~8500	97	5
首都医科大学三博脑科医院	北京	256	~4000	58	44

数据来源：各医院官网，三博脑科招股书，东北证券

注：副高职称以上医生数采用神经外科+神经内科口径

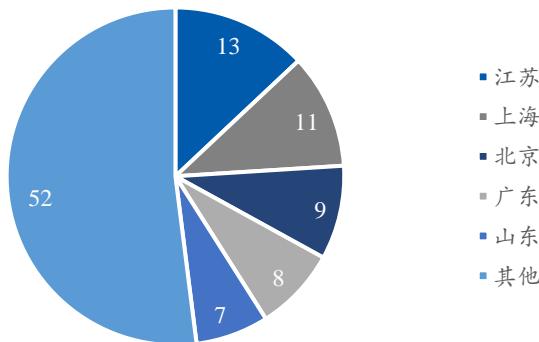
头部脑科医院分布较为集中，地区间脑科医疗供给差异大。按前述榜单，Top50 脑科医院中超过一半分布在上海、北京、江苏、广东、浙江这 3 省 2 市，Top100 脑科医院也有近一半分布在江苏、上海、北京、广东、山东这 3 省 2 市。头部脑科医院数量与地区发达程度相关性较强。有 2 家及以上医院入选脑科 Top50 的仅有 12 个省市，2 家及以上入选脑科 Top100 的仅有 21 个省市；无医院入选脑科 Top50 的多达 12 个省市，无医院入选脑科 Top100 的也有 5 个省市。地区间脑科医疗供给差异显著。

图 16: Top50 神经外科医院地区分布



数据来源：2022 年度中国医院科技量值 (STEM) - 神经外科榜单，东北证券

图 17: Top100 神经外科医院地区分布



数据来源：2022 年度中国医院科技量值 (STEM) - 神经外科榜单，东北证券

民营脑科连锁因门槛较高而相对稀缺。除上市公司三博脑科外，相对知名的民营脑科连锁还有蓝生脑科、冬雷脑科、壹博脑科等。蓝生脑科为新希望集团下主要医疗健康平台，目前拥有 3 家综合医院与 5 家脑专科医院，医院数量略多于三博脑科，其中苏州、四川、深圳的脑专科医院较新，仅开业约一年到一年半。冬雷脑科由前华山医院神经外科主任宋冬雷创办，目前有上海与成都 2 家脑专科医院，其中成都医院开业不足半年。壹博脑科由前华山医院神经外科教授孙成彦创办，目前有上海 1 家医院。

表 3：头部民营神经专科连锁概况

连锁名称	医院名称	建筑面积 (平方米)	床位数	医院性质
三博脑科 2023.05 上市	北京三博脑科医院 (2004)	12000	256	三级脑专科医院
	昆明三博脑科医院 (2014.01)	6000	150	三级脑专科医院
	重庆三博江陵医院 (2014.12 改制)	22000	400	以脑专科为特色的 二级综合医院
	重庆三博长安医院 (2014.12 改制)	24000	500	以脑专科为特色的 二级综合医院
	福建三博福能脑科医院 (2017.07)	14000	300	三级脑专科医院
	洛阳伍一一三博脑科医 院 (2019.07 改制)	-	260	二级综合医院
蓝生脑科 新希望集团下 主要医疗健康 平台	河南三博脑科医院 (2021.09)	9000	先期 100 规划 300	三级脑专科医院
	上海天佑医院 (2015.03)	50000	850	以神经内科为特色的综合医院 (按三级标准创建)
	上海蓝十字脑科医院 (2016.02)	32000	700	脑专科医院
	上海蓝生万众医院 (2009.04)	二期 80000	二期 1200	(按三级标准创建)
	上海蓝生宏德医院 (2019.11)	占地 27000	200	以中医、口腔、康复为重点的 综合医院
	慈溪蓝十字脑科医院 (2020.04)	12000	200	以康复、神经内科为重点的 综合医院
冬雷脑科 目标 2030 年 15 家医院 8000 张床位	苏州蓝十字脑科医院 (2022.07)	31000	二期 300	(上海蓝十字分院)
	四川蓝生脑科医院 (2022.09)	40000	500	三级脑专科医院
	深圳蓝生脑科医院 (2023.02)	30000	500	三级脑专科医院
	上海冬雷脑科医院 (2019.10)	20000	500	三级脑专科医院
	成都冬雷脑科医院 (2023.07)	133	300	二级脑专科医院
	上海壹博医院 (2021.05)	7000	115	以神经专科为特色的综合医院
壹博脑科 前华山医院 神经外科主任 孙成彦创办	天津壹博脑科医院 (建设中, 2024.04)	18000	300	以功能神经外科为特色的 三级专科医院
	扬州壹博脑科医院 (2023H1 开工)	46000	500	以康复、神经外科为特色的 三级专科医院

数据来源：各医院官网，东北证券

2. 脑科连锁：高壁垒的医疗服务赛道，以三博脑科为例

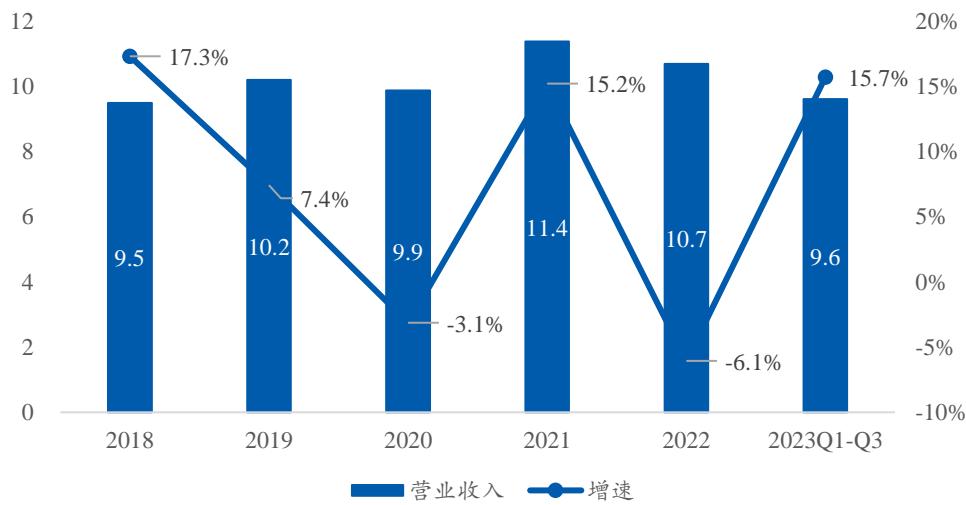
本节以三博脑科为例，对脑科连锁的整体财务情况，以北京三博为代表的头部脑专科医院，以福建三博为代表的区域脑专科医院分别进行分析。

三博脑科营业收入增长较为稳健，2017-2022 年营收 CAGR 约 6%，销售药品收入占比逐年下降。医疗服务成本中人工成本与直接材料为主要项目，且较其他医疗服务行业处于较高水平，期间费用以管理费用为主。公司拥有一支技术水平高、数量稳健增长的医师团队。北京三博是处于成熟期的头部脑专科医院，2026 年起搬入新院区有望打开增长空间。其收入以住院与神经外科为主，医疗服务毛利率相对较高，各项成本均低于公司整体水平。医院手术台数较多，床位利用已接近饱和，医生团队实力雄厚，人均创收高，医疗设备投入大。福建三博是处于爬坡期的区域脑专科医院，收入与利润率有望持续提升。其收入同样以住院与神经外科为主，神经内科与销售药品收入相对较高。受床位开放比例与利用率较低影响，医院房租折旧成本较高影响医疗服务毛利率。

2.1. 公司整体财务分析：收入稳健增长，医疗服务成本较高

三博脑科营业收入增长较为稳健。公司 2022 年营业收入为 10.7 亿元，2017-2022 年营收 CAGR 约 6%，其中 2020 与 2022 年受疫情影响较大，营收出现一定负增长。公司 2023Q1-Q3 营业收入为 9.6 亿元，同比增长 15.7%。由于脑科医院成本投入高，对资深医生需求大，公司外延扩张相对较慢，营收增长更多来源于内生增长。

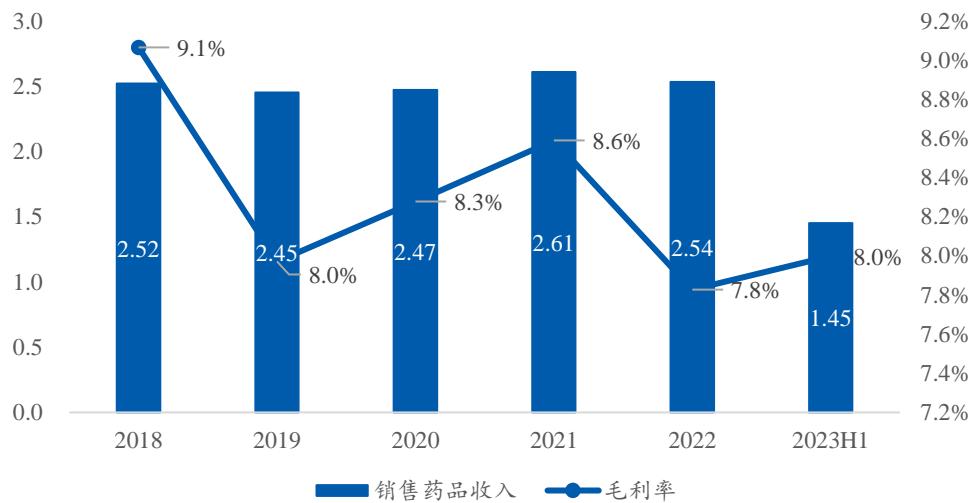
图 18：三博脑科营业收入（亿元）及增速



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

三博脑科销售药品收入占比逐年下降，毛利率逐步稳定。公司营业收入主要为医疗服务收入与销售药品收入两部分。2022 年公司销售药品收入为 2.54 亿元，2018-2022 年基本持平。由于政策对医院药占比的要求，公司销售药品收入占比逐年下降，由 2017 年的 27.1% 降至 2023H1 的 22.7%。药品毛利率由 2017 年的 10.7% 降至 2019 年的 8.0% 后较为稳定，2019-2023H1 有小幅波动，2023H1 药品毛利率为 8.0%。

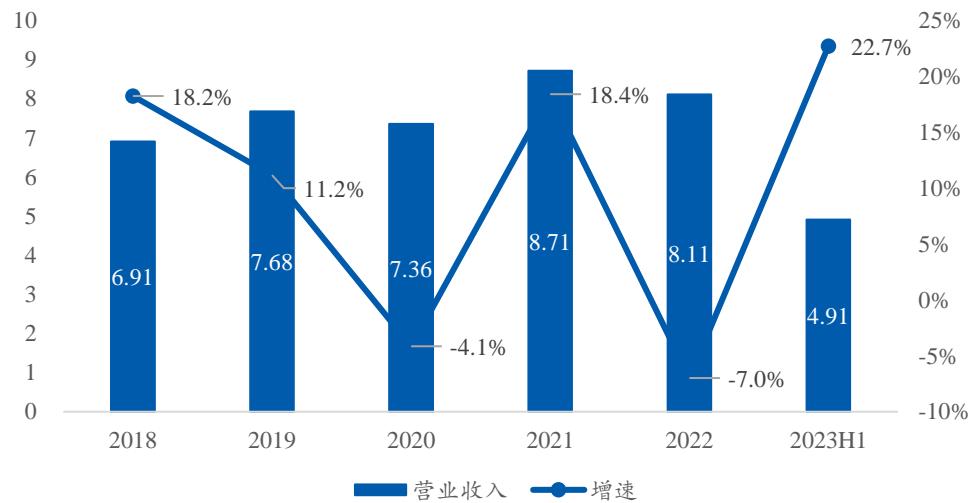
图 19: 三博脑科销售药品收入 (亿元) 及毛利率



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

三博脑科医疗服务收入增长略快于整体收入。公司2022年医疗服务收入为8.11亿元，2017-2022年CAGR约7%，略快于整体收入增长。公司年医疗服务增速与营收增速相仿，2020与2022年受疫情影响较大。2023H1医疗服务收入同比增长22.7%，疫后恢复较为明显。

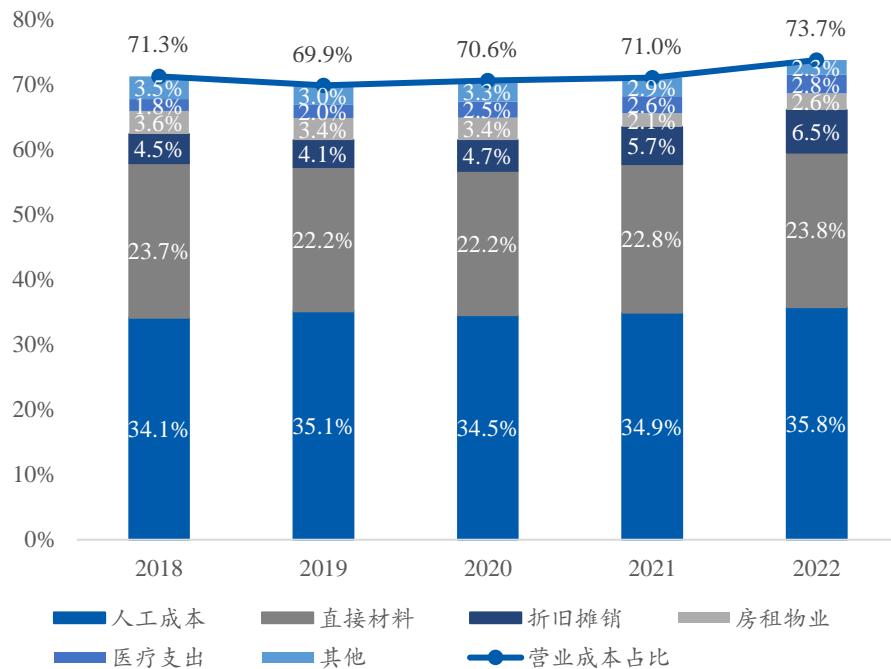
图 20: 三博脑科医疗服务收入 (亿元) 及增速



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

三博脑科医疗服务成本中人工成本与直接材料为主要项目。公司人工成本占医疗服务收入约34-36%，直接材料占22-24%，近年来较为稳定，占据公司医疗服务成本中的大部分。其余项目包括折旧摊销与房租物业，合计占医疗服务收入的7.5-9%（受新租赁准则影响，部分之前的房租物业费用被计入使用权资产折旧摊销中）。还包括医疗支出及其他杂项，合计占医疗服务收入的5-6%。2023H1公司医疗服务毛利率为28.1%，较疫情影响下的2022年上升1.8%。

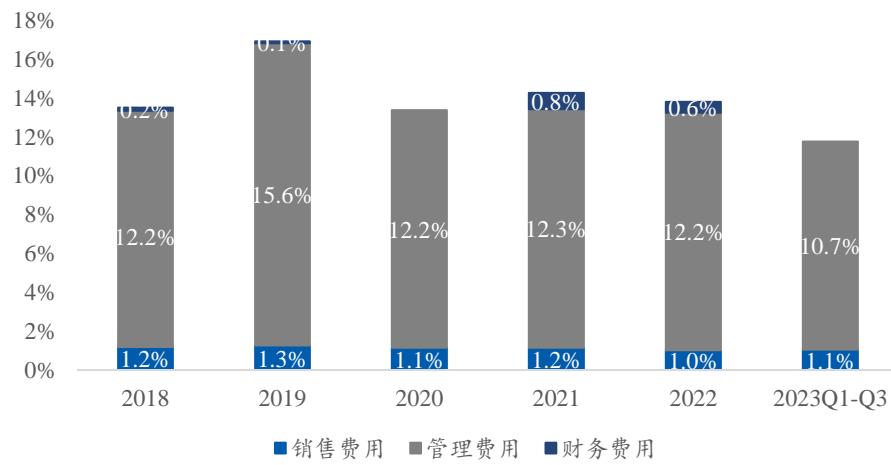
图 21：三博脑科医疗服务成本结构



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

三博脑科期间费用以管理费用为主。公司管理费用长期在 12% 左右，2023 前三季度略降至 10.7%。管理费用中约 60% 为职工薪酬，约 20% 为房租物业及折旧摊销。管理费用率整体水平与其他医疗服务公司相近。公司销售费用稳定在 1% 左右，主要由于脑科属于严肃医疗，营销受较严格的管制且效果有限，相对更依赖口碑传播。公司财务费用率不足 1%，有息负债较少。

图 22：三博脑科期间费用结构



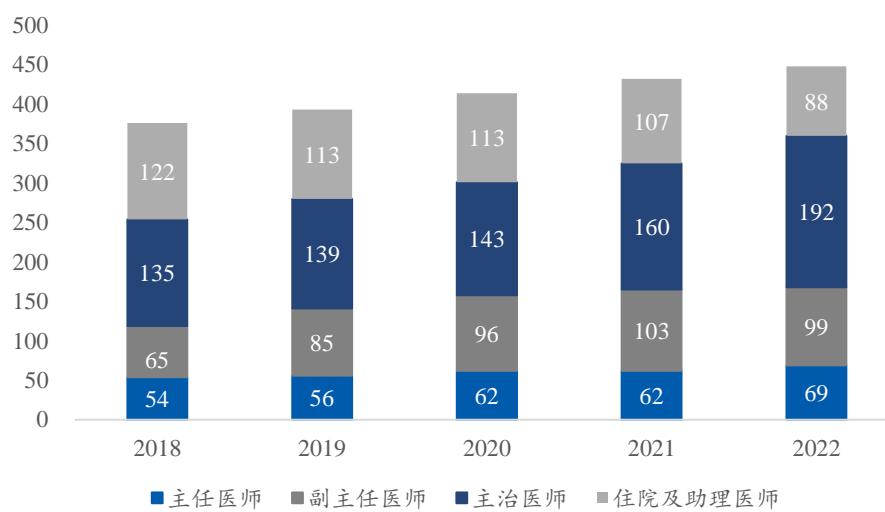
数据来源：三博脑科招股书，东北证券

脑科医生培养周期长、成功难度大，而脑科医疗对医生素质有较高要求。脑科医生从本科毕业至晋升为副主任，博士学历一般需要 10 年以上（硕博连读 5-6 年+主治升副主任 5-7 年），硕士或本科学历一般需要 15 年以上（硕士 3 年+住院升主治 2 年+主治升副主任 10 年），培养周期长。而四级手术一般仅能由副主任及以上职称的

医生完成，四级手术中较难的 30%更是只能由主任医师完成。因此，医生团队的实力对于脑科医院极为重要。

三博脑科拥有一支技术水平高、数量稳健增长的医师团队。公司 2022 年共有医师 448 人，其中主任医师 69 人，2018-2022 年 CAGR 约 6%，副主任医师 99 人，2018-2022 年 CAGR 约 11%。公司医师团队中有博士 54 人，硕士 91 人。公司医师近 5 年离职率保持在 10%左右，医师团队较为稳定。

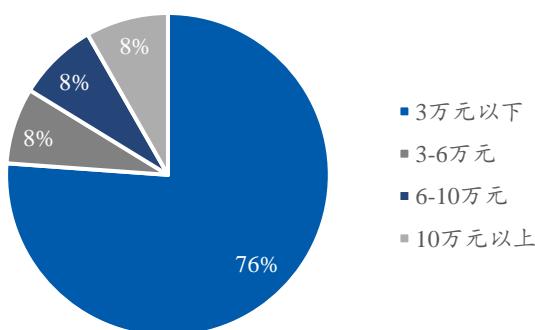
图 23：三博脑科医生职称分布



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

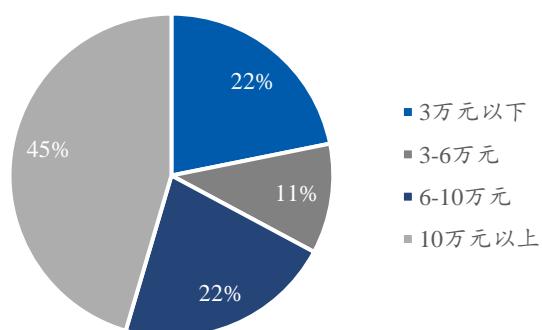
相对较少的重症患者贡献三博脑科的较大部分收入。2021 年公司住院患者中人均开支 3 万元及以下的占比为 76%，而其收入贡献仅为 22%。人均开支 6 万元及以上的患者占比仅 16%，其收入贡献则高达 67%。公司每年 3800-5000 名重症患者贡献公司住院收入的 55-65%。

图 24：2021 年三博脑科住院患者结构（按人均开支）



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

图 25：2021 年三博脑科住院收入结构（按人均开支）



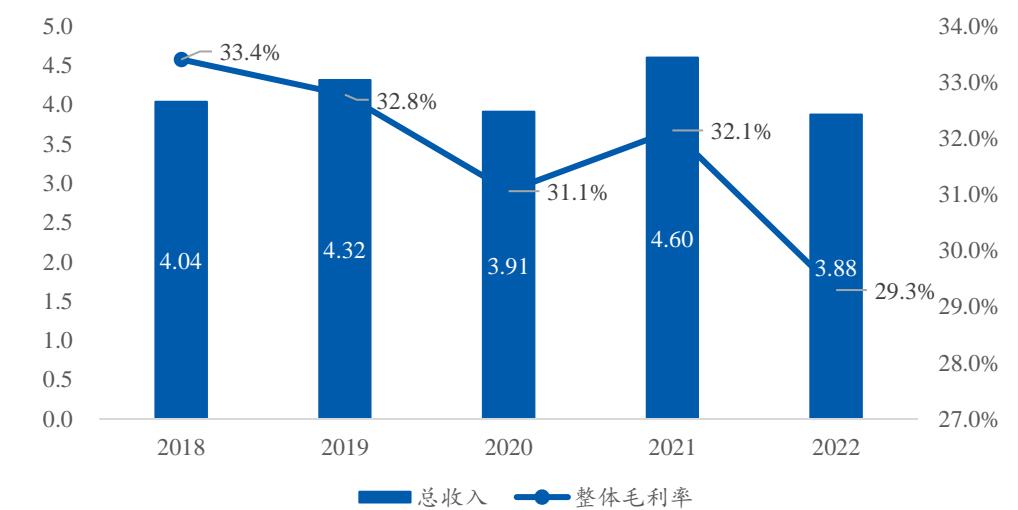
数据来源：三博脑科招股书，东北证券

2.2. 北京三博医院经营分析：医生产值较高，经营效率较高

北京三博脑科医院成立于2004年，是以神经外科为特色的三级医保定点专科医院，也是首都医科大学附属医院。医院拥有“医教研”一体化的综合平台，担负着三博脑科人才培养输出基地、疑难重症诊疗中心、科技创新和临床转化中心的职能。医院医疗团队强大、硬件设施先进，硕士及以上学历人数超过全体临床医师的75%，配备百级净化手术室、层流ICU、306通道脑磁图、Rosa机器人手术导航系统等高尖端医疗设备。医院有8个神经外科病区、1个神经内科病区以及神经肿瘤化疗科、神经心理、医学影像、医学检验、分子神经病理室等医疗医技科室。医院手术难度高，四级手术占比超85%，肿瘤择期手术量超50%。

北京三博已处于成熟期，新院区有望打开增长空间。北京三博2021年收入为4.6亿元，占公司收入约40%，2018-2021年CAGR约4%。2020与2022年收入受疫情影响有一定下滑。2021年医院整体毛利率为32.1%，一定程度受DRG支付改革影响略有下滑，但仍高于公司整体约24%的毛利率水平。北京三博新院区处于建设中，预计床位规模为400-500张，较目前256张的注册床位数（开放床位数254张）增长55-95%。2025年末搬入新院区后，医院有望打开增长空间。

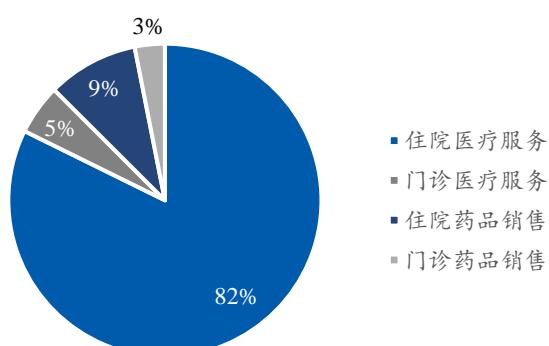
图 26：北京三博收入（亿元）及毛利率



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

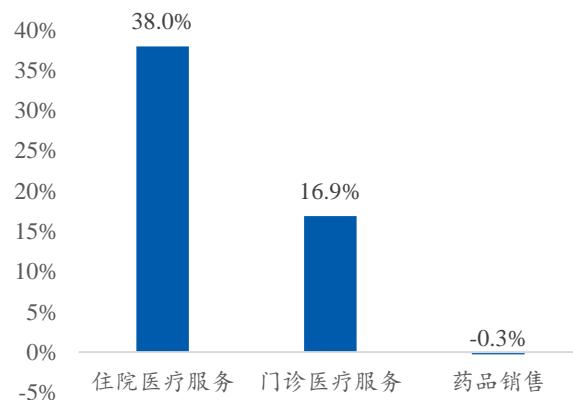
北京三博收入以住院医疗服务为主，其毛利率水平也最高。住院医疗服务收入占医院总收入的81-83%，而门诊医疗服务收入仅占3-5%，药品收入占12-15%，大部分收入由住院医疗服务贡献。毛利率方面，2021年北京三博住院服务毛利率达38%，而门诊服务毛利率仅17%。药品由于北京三博采取“零加成”政策，毛利率接近0。

图 27: 2021 年北京三博收入结构 (按门诊住院)



数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券

图 28: 2021 年北京三博各业务毛利率



数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券

分科室看, 北京三博住院收入以神经外科为主。住院收入中神经外科占 85%, 神经介入科、神经肿瘤化疗科、神经内科仅分别占 8%、6%、1%, 主要由于神经外科手术产值较高。门诊收入中神经内科、神经外科及介入科、神经肿瘤化疗科较为均匀, 均占 30%左右。

图 29: 2021 年北京三博住院收入结构 (按科室)

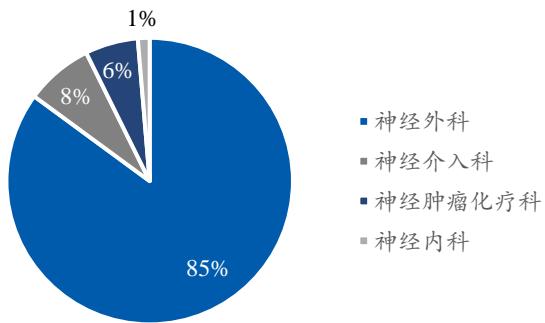
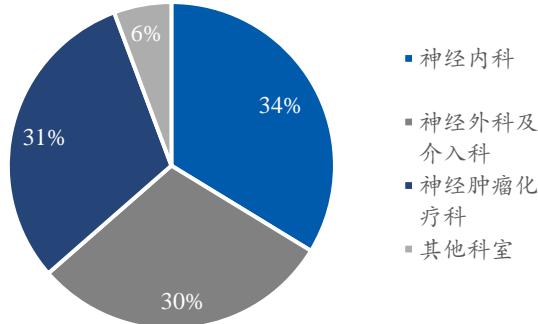
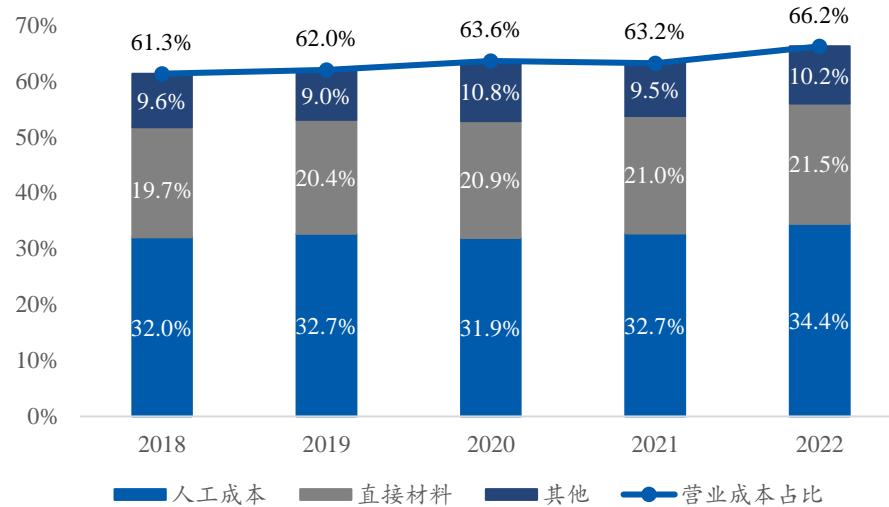

 数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券
 注: 含销售药品收入

图 30: 2021 年北京三博门诊收入结构 (按科室)


 数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券
 注: 含销售药品收入

北京三博医疗服务毛利率较高, 各项成本均低于公司整体水平。医院 2021 年医疗服务毛利率为 36.8%, 较公司整体高 7.8%。成本项中其他成本差距较大, 北京三博 2021 年为 9.5%, 较公司整体低 3.8%。房租物业、折旧摊销等其他固定成本在单床产出较高时能得到明显摊薄。医院 2021 年人工成本占比为 32.7%, 较公司整体低 2.2%; 直接材料成本占比 21%, 较公司整体低 1.8%。

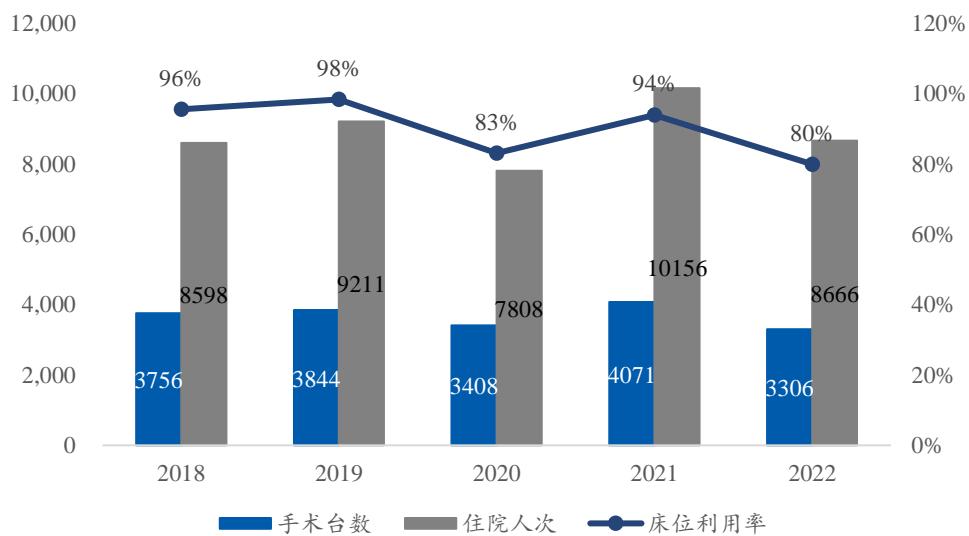
图 31：北京三博医疗服务成本结构



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

北京三博手术台数较多，床位利用已接近饱和。医院 2021 年开展手术 4071 台，全部为神经外科手术，占公司神外手术总量的约 70%，与其他公立医院相比也属于头部水平。医院 2021 年住院人次 10156 人为历史最高值，床位利用率为 94%，较 2019 年有所下降，但仍处于高度饱和水平。医院为提高运营效率进一步降低了平均住院天数。北京三博 2021 年单床产出达 180 万元/年。

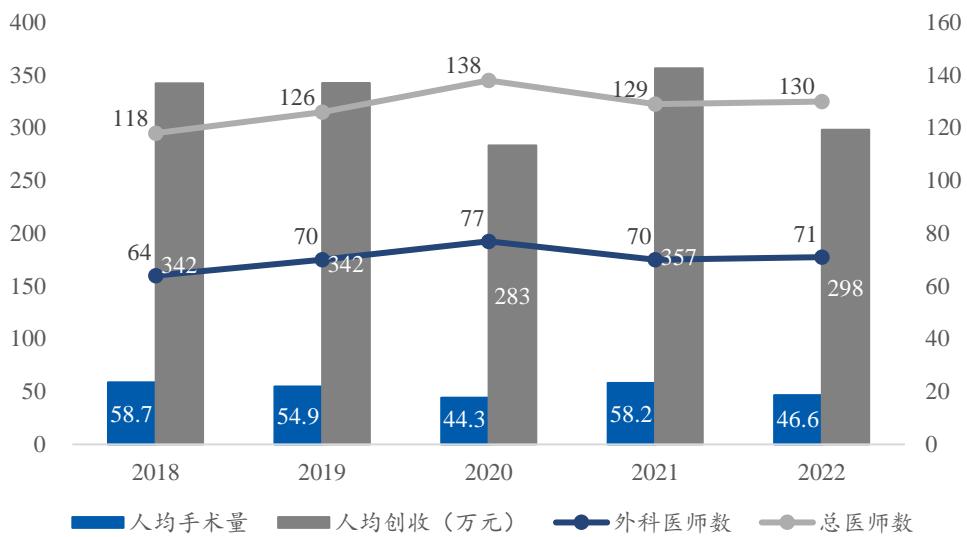
图 32：北京三博手术台数、住院人次与床位利用率



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

北京三博医生团队实力雄厚，人均创收高。医院 2022 年总医师数 130 名，占公司医生总数的约 30%；其中外科医师 71 名，占公司外科医师的 40%。医师人数较为稳定。2021 年医院医师平均手术台数 58.2 台，全部为神经外科手术；平均创收 357 万元，显著高于公司整体水平。

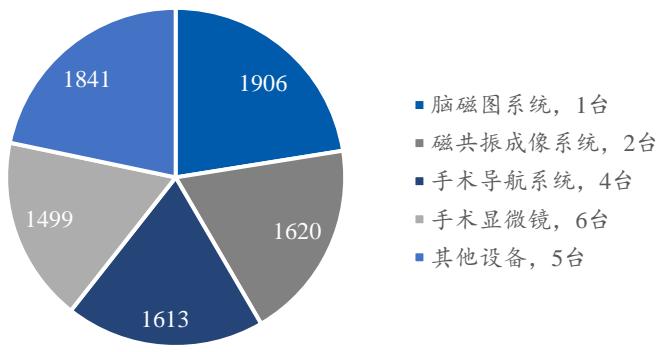
图 33：北京三博人均手术量、人均创收（万元）与医师数



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

北京三博医疗设备先进，投入较大。医院单价超 150 万元的大型医疗设备原值合计约 8500 万元，占公司整体大型设备投入的 43%。医院配备 1 台脑磁图系统，2 台磁共振成像系统，4 台手术导航系统，6 台手术显微镜，及内窥镜摄像系统、X 射线计算机断层摄影设备、医用血管造影 X 射线系统等。

图 34：北京三博大型医疗设备投入（万元）



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

注：采用设备原值计算

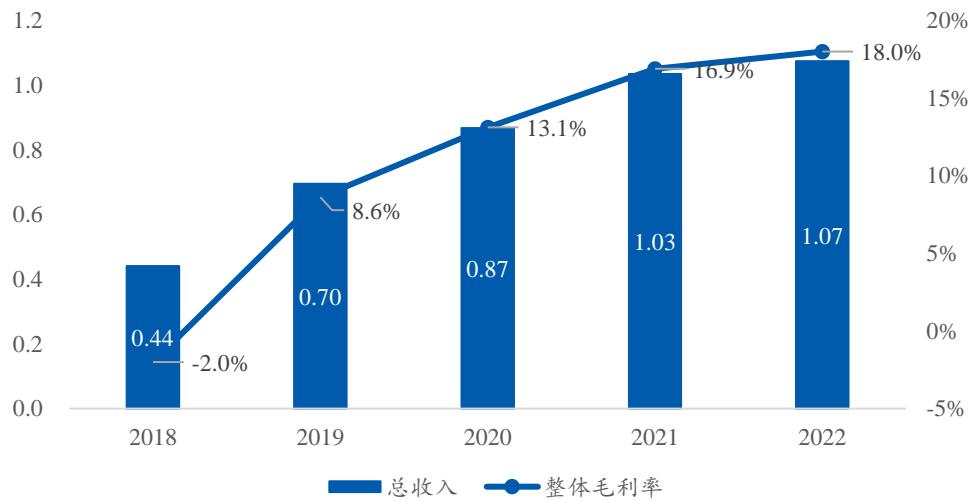
北京三博医保收入占比较低，主要由于异地患者占比较高所致。医院 2022 年医保收入 1.02 亿元，占医院收入的 26.4%，而 2018 年医保收入仅 0.32 亿元，占医院收入的 7.9%。近年来医保收入显著上升的主要原因为异地患者的报销方式由自付后回参保地报销（医院端计入自费收入）逐步变为医保异地直接结算所致。此外，神经专科的医保目录外自主定价项目也相对较多，故医保占比整体较低。

2.3. 福建三博医院经营分析：爬坡期较长，提升空间较大

福建三博福能脑科医院于 2017 年正式运营，是福建省首家三级神经专科医院。福建三博医师团队与医疗设备在当地具有优势。北京三博派驻神经外科首席专家林志雄、神经内科首席专家吴钢常驻福建，并汇集张金锋、翁超群等一批在福建省内具有丰富临床经验和现代医学理念的知名神经医学专家。福建三博拥有 3.0T 核磁共振、64 排 128 层螺旋 CT、DSA、新型头部多源 γ 射束立体定向放射治疗系统（头部伽玛刀）、神经外科手术机器人、婴幼儿氧舱（小儿高压氧舱）等先进设备。

福建三博处于爬坡期，收入与利润率有望持续提升。福建三博 2022 年收入为 1.07 亿元，占公司收入约 10%，2018-2022 年 CAGR 约 25%。医院处于成长期，2022 年疫情影响下收入仍略有增长。2022 年医院整体毛利率为 18%，随收入增长而迅速上升。福建三博注册床位数为 300 张，2018-2022 年分别开放床位 69、160、170、178、178 张，床位仍有约 40%未开放，增长空间较大。脑科医院爬坡期相对较长，2020 年（第 3 个完整经营年度）福建三博达到微盈状态，2022 年（第 5 个完整经营年度）医院净利润约 6%。

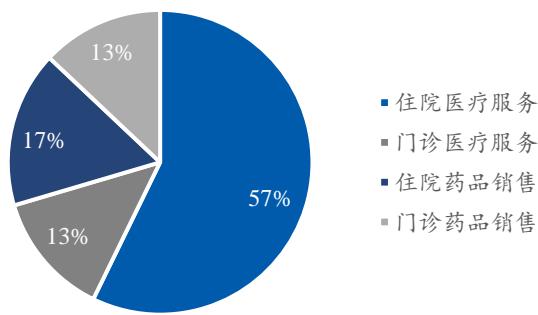
图 35：福建三博收入（亿元）及毛利率



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

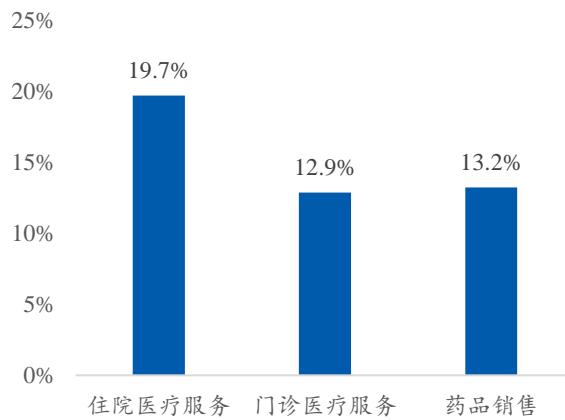
福建三博收入以住院医疗服务为主，药品收入占比相对较高。住院医疗服务收入占医院总收入的 52-58%，门诊医疗服务收入占 11-15%，药品收入占 29-35%，大部分收入由住院医疗服务贡献。近年来药品收入占比逐步下降，住院收入占比逐步上升。毛利率方面，2021 年福建三博住院服务毛利率约 20%，门诊服务毛利率约 13%，销售药品毛利率约 13%。脑专科医院普遍门诊收入占比较低。

图 36: 2021 年福建三博收入结构 (按门诊住院)



数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券

图 37: 2021 年福建三博各业务毛利率



数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券

分科室看, 福建三博住院收入以神经外科为主, 神经内科收入占比相对较高。住院收入中神经外科占 75%, 神经内科占 14%, 重症监护中心、疼痛科、康复科等合计占 11%。福建三博神经内科相对较强。门诊收入中神经内科与神经外科分别在 35% 与 31%, 影像科收入为福能医院采购影像检查的合作收入, 占 21%。

图 38: 2021 年福建三博住院收入结构 (按科室)

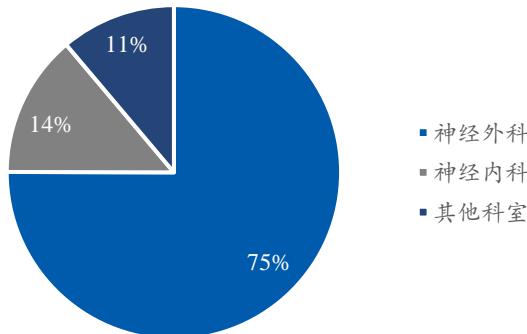
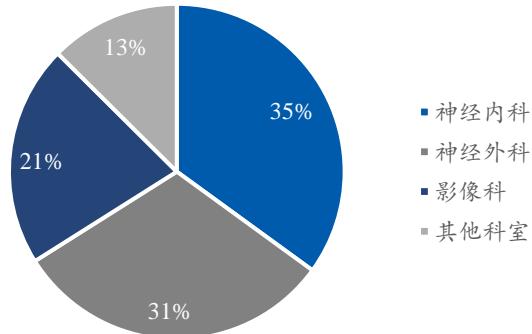
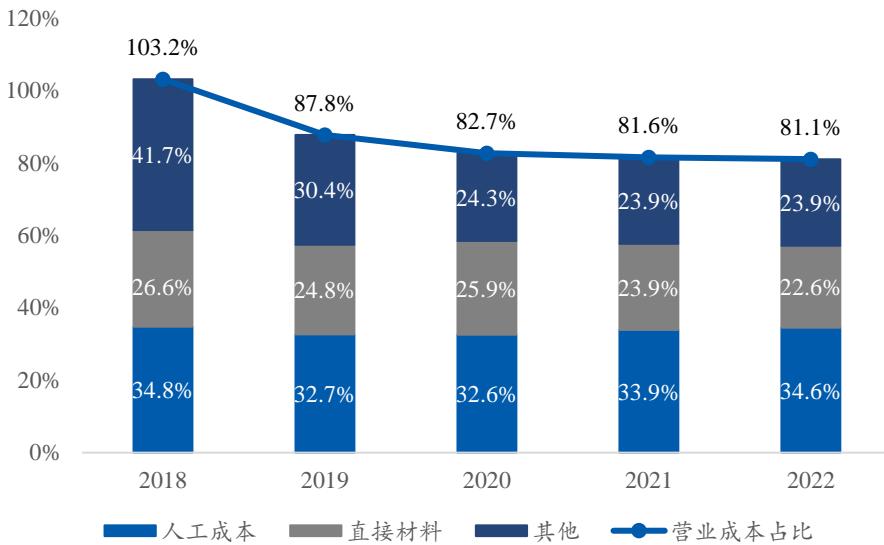

 数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券
 注: 含销售药品收入

图 39: 2021 年福建三博门诊收入结构 (按科室)

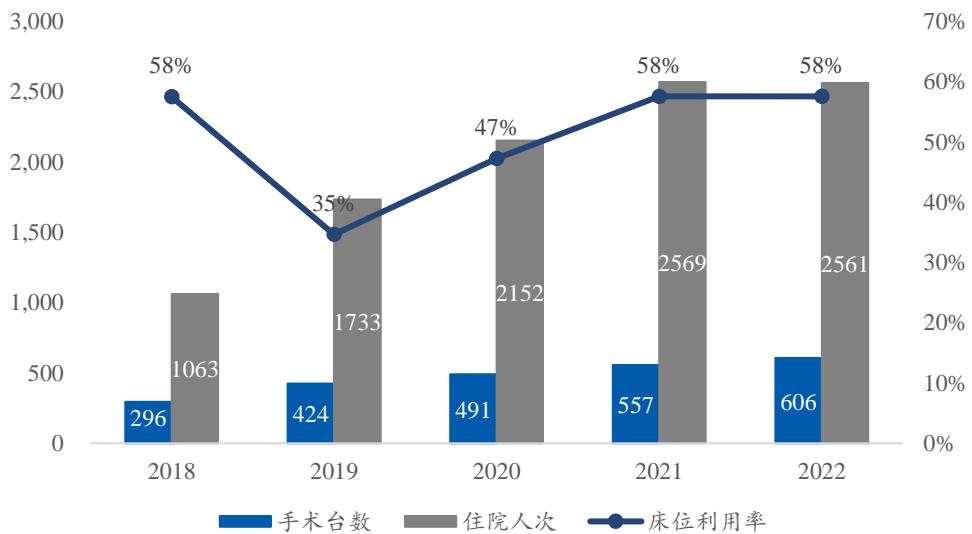

 数据来源: 三博脑科招股书, 东北证券
 注: 含销售药品收入

福建三博医疗服务毛利率逐年上升, 房租折旧成本较高。医院 2021 年医疗服务毛利率为 18.4%, 较公司整体低 10.6%。成本差距几乎全部来源于其他成本, 福建三博 2021 年为 23.9%, 较公司整体高 10.6%。主要由于医院仍处于爬坡期, 房租物业、折旧摊销等其他固定成本未得到明显摊薄。医院 2021 年人工成本占比为 33.9%, 较公司整体低 1%; 直接材料成本占比 23.9%, 较公司整体高 1%。

图 40：福建三博医疗服务成本结构


数据来源：三博脑科招股书，东北证券

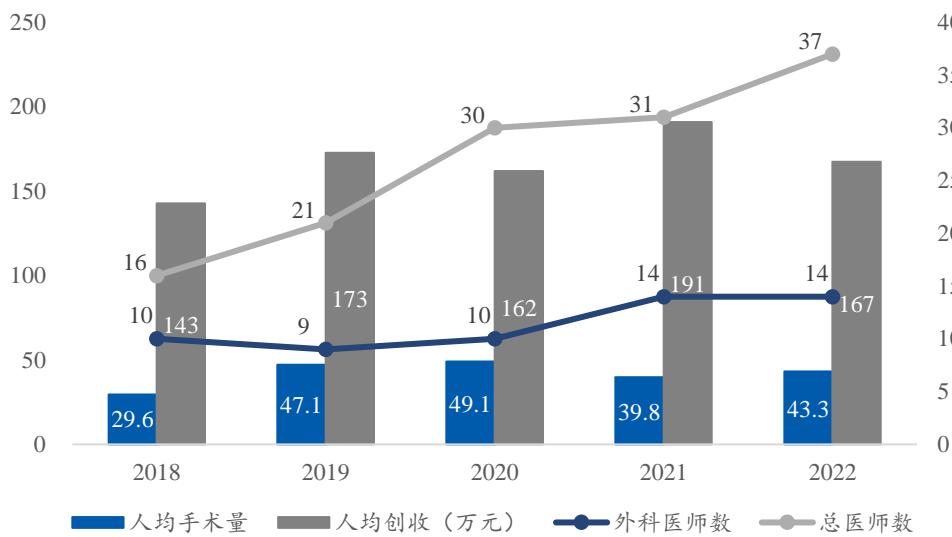
福建三博床位利用率仍有较大提升空间。医院 2021 年开展手术 557 台，其中神经外科手术 554 台，占公司神外手术总量的约 10%，住院人次 2569 人。床位利用率受医院床位开放情况影响，近两年为 58%，有较大提升空间。福建三博 2021 年单床产出仅约 60 万元/年。

图 41：福建三博手术台数、住院人次与床位利用率


数据来源：三博脑科招股书，东北证券

福建三博医师人均产出有较大提升空间。医院 2022 年总医师数 37 名，其中外科医师 14 名。近年来神经内科医师较多。2021 年医院医师平均手术台数 39.8 台，绝大部分为神经外科手术；平均创收 191 万元，有较大提升空间。

图 42: 福建三博人均手术量、人均创收（万元）与医师数

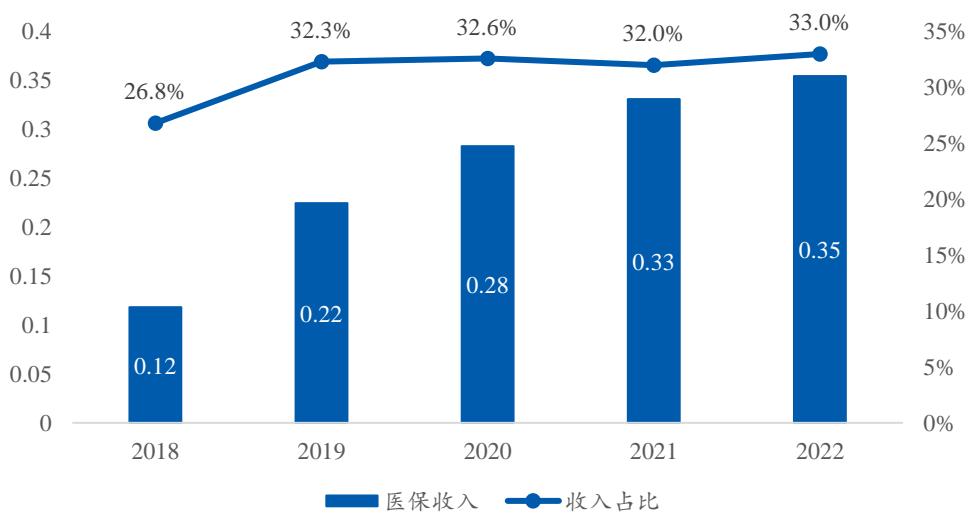


数据来源：三博脑科招股书，东北证券

福建三博医疗设备投入较大。医院单价超 150 万元的大型医疗设备原值合计约 3400 万元，占公司整体大型设备投入的 17%。医院配备 1 台磁共振成像系统，1 台头部多源 γ 射束立体定向放射治疗系统，1 台医用血管造影 X 射线机，1 台 CT 全身 X 射线计算机体层螺旋扫描装置系统，1 台手术显微镜，1 台手术导航系统。

福建三博医保收入占比较为稳定。医院 2022 年医保收入 0.35 亿元，占医院收入的 33%，近年来医保收入较为稳定。神经专科医保目录外自主定价项目相对较多，医保占比整体较低。

图 43: 福建三博医保收入（亿元）



数据来源：三博脑科招股书，东北证券

3. 脑机接口：机器与生物智能交互，临床落地近在咫尺

3.1. 脑机接口概念

脑机智能的实现依赖于大脑和机器之间的信息交互。信息交互包含两个方向，一是从脑到机：将脑信息“读出来”；二是从机到脑：将外部信息或指令“写进去”。两者之间的纽带是脑信号编解码技术，通过计算方法将“读出来”的脑信号解析成可理解的意图（如运动、语音）、信息（如视觉、听觉）或状态（如疲劳）信号，再根据任务决策将外部信息写入大脑，实现脑机之间的智能互联。

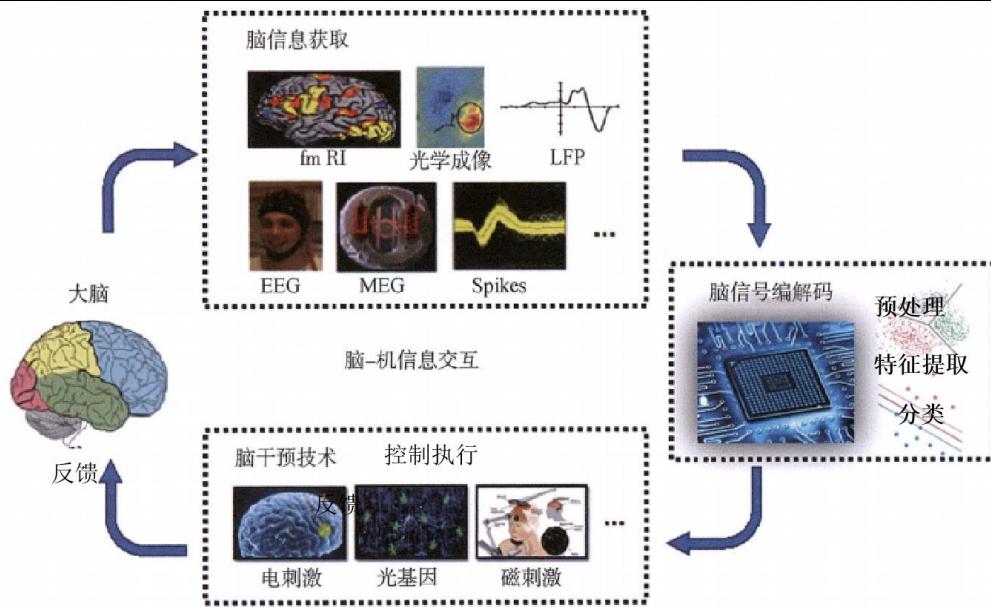
脑电生理信号是脑机智能系统中最常用的信号类型，从信号采集角度可分为侵入式、非侵入式、半侵入式三类。常用的侵入式脑电信号包括神经元锋电位、局部场电位，半侵入式如皮质脑电，非侵入式如头皮脑电。侵入式神经接口需要将皮质内微电极（IM）直接植入人脑，功效最佳但风险最大；非侵入性神经接口通过使用脑电图（EEG）、脑磁图（MEG）或功能性磁共振成像等从头部表面分析大脑活动，无需植入电极；部分侵入式脑机接口的电极位于大脑表面的颅骨下方，例如脑皮层电图（ECoG）。由于与皮质表面直接接触，具有出色的时间和空间分辨率，但需手术植入电极，感染和创伤风险较大。

神经元锋电位能够记录单个神经元动作电位发放，通常采用植入大脑的微电极阵列进行信号采集。局部场电位信号同样通过植人大脑的电极采集，其信号来自局部细胞集群，是电极周围细胞产生的突触后电位的叠加。皮质脑电图信号是通过放置在大脑皮质表面的电极记录的颅内神经信号。头皮脑电是一种非侵入式的脑电活动监测技术，通过将电极放置于头皮处，记录脑内活动产生的电压波动，相比于侵入式采集方法具有方便、安全的优势，因而被广泛使用。

脑机接口是指在有机生命形式的脑与具有处理或计算能力的设备之间，创建用于信息交换的连接通路，实现信息交换及控制，测量大脑活动并将其转化为计算机或其他设备的命令，允许用户仅使用他们的思想来控制机器和设备。

脑机接口（BCI, Brain Computer Interface）能够实现信息的双向传递，从而使大脑控制外部设备。电极检测大脑信号，由BCI微控制器处理这些信号，以消除由外部和设备特定因素引起的任何噪声或伪影。随后，通过人工神经网络对获得的信号进行分析，识别出对应的命令。检测到的命令通常被发送到外部设备，以便根据预编程的算法进行进一步处理。脑机接口技术是将人脑与计算机、外部设备等智能系统相连的一种技术，它可以将人脑中的信息转化为计算机可以理解的信号，实现对机器的控制和交互。

图 44: 脑机接口系统框架——脑机信息交互

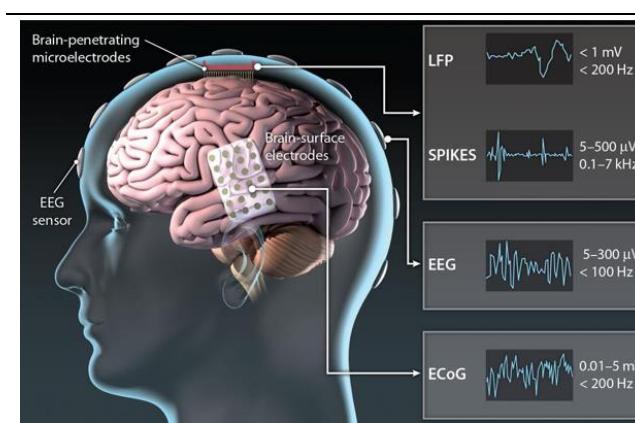


数据来源: 神经科学, 东北证券

3.2. 脑机接口技术及分类: 非植入式无创技术受关注

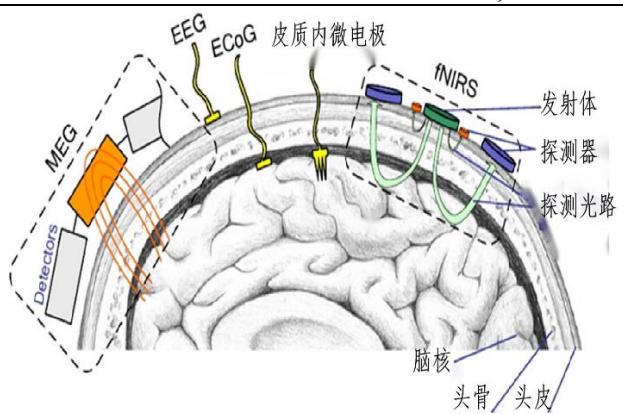
脑机接口技术的流程主要包括脑电信号采集、信号预处理、特征提取、分类识别等步骤。脑电信号采集需要通过电极将信号从脑部采集出来,因此脑机接口电极的制备是关键前提。信号预处理使用脑电信号预处理芯片,可以对采集到的信号进行滤波、降噪等处理,提高信号的质量。特征提取需要从复杂的脑电信号中提取出与特定任务相关的特征,进而用于分类识别。分类识别则是将特征与已知任务的模型进行比较,最终实现对任务的识别和控制。

图 45: 脑电技术手段及波段示意图



数据来源: 神经科学, 东北证券

图 46: BCI 传感器安装类型——有创 (IM)、半创 (ECoG) 和无创 (MEG、EEG、fNIRS)



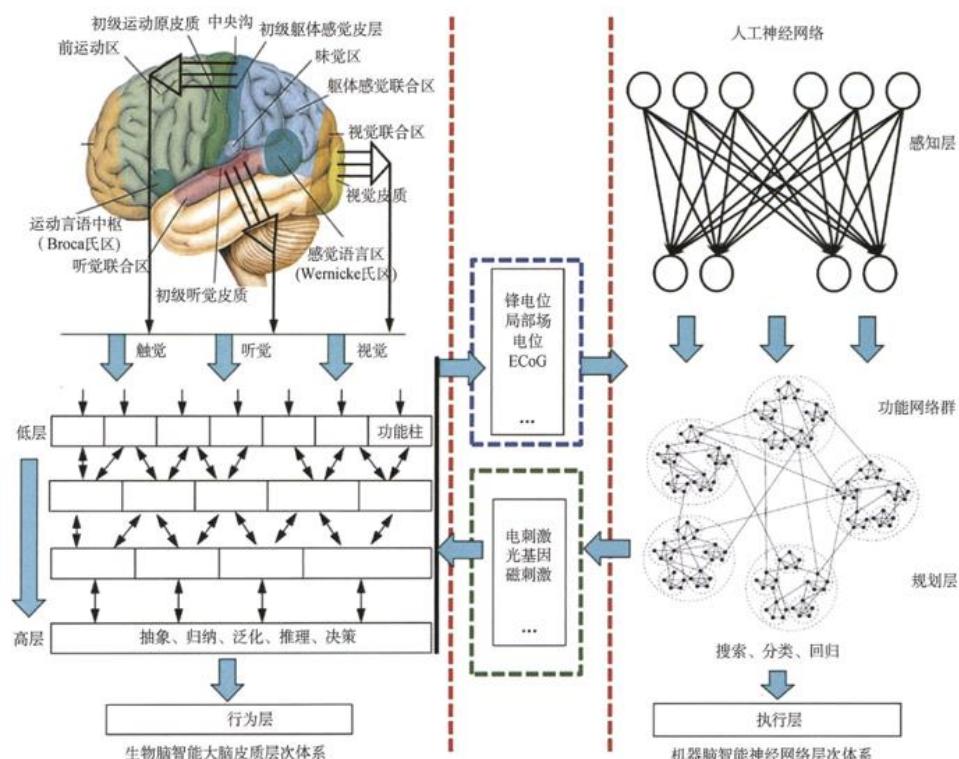
数据来源: Sensors, 东北证券

根据不同的信号来源和应用场景,脑机接口技术可以分为多种不同类型,例如基于脑电信号、脑磁信号、脑血流动力学信号等不同的类型。此外,脑机接口技术还可以根据控制目标的不同,分为控制外骨骼、控制移动设备、辅助交流等不同类型。脑机接口按照信号采集方式不同主要分为植入和非植入两种技术路线。

植入式脑机接口是有创方式，是指对深入到颅骨以下的组织进行信号采集和记录。常见技术手段包括皮层脑电图 (Electrocorticogram, ECoG)、单个神经元的动作电位 (Spike) 和局部场电位 (Local Field Potential, LFP)。也有技术以介入为手段，以创伤性较小的方式将电极送入颅内血管来采集脑电信号。植入式脑机接口记录的信号时空分辨率高、信息量大，能够对复杂任务进行实时、精确控制。植入式脑机接口技术主要应用在医疗领域，最有可能率先落地并带来市场收益的是神经替代、神经调控相关技术和产品。神经替代脑机接口技术是为了弥补特殊人群因器官损伤导致的信息收发能力缺损，采用脑机接口技术把感觉信息直接写入脑，或是将脑意图信息从脑内读出，解码后实现对外交互，完成意愿动作。

非植入式脑机接口由于安全无创，因此得到了广泛的研究与产业应用，但受限于在脑外采集信号的强度与噪声干扰，目前可实现的脑机交互性能有限。非植入式脑机接口采用无创采集技术在头皮表面或附近采集大脑响应信号。常用技术手段包括脑电图 (Electroencephalography, EEG)、功能近红外光谱 (Functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)、脑磁图 (Magnetoencephalography, MEG)、功能核磁共振成像 (Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)。非植入式脑机接口技术可应用在更广泛的生活生产领域，正逐步在康复训练、教育娱乐、智能生活、生产制造等众多方面为人类带来福祉。

图 47：脑机智能的实现方案



数据来源：神经科学，东北证券

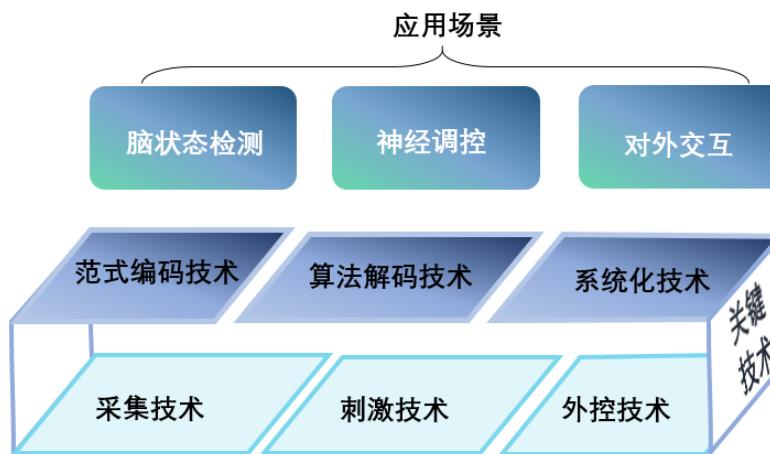
3.3. 脑机接口的关键技术及发展历史

3.3.1. 脑机接口的关键技术

脑机接口关键技术包括采集技术、刺激技术、范式编码技术、解码算法技术、外设技术和系统化技术。其中，采集技术研发重点包括采集端和信号处理端。采集端常规技术手段包括电采集、磁采集、近红外采集等手段，其中电采集为主流研发方向，磁和近红外等采集技术因为成本和技术成熟度等制约，距离应用落地相对更远。信号处理端涉及模拟芯片和数字芯片。由于当前脑机接口系统所用的数字芯片多为行业通用芯片，所以重点介绍模拟芯片的发展。刺激技术重点介绍脑深部电极刺激（Deep Brain Stimulation, DBS）闭环控制的进展，以及脑机接口技术在助盲领域的最新进展。范式编码和解码算法技术介绍了当前主流研究进展。由于外控技术和系统化技术的创新多在于工程集成，因此不在此介绍。

脑机接口技术的应用场景按照信息流向分为脑状态检测、神经调控和对外交互三类。从信息流向来看，脑状态检测是信息从大脑流向外部和外设，神经调控则是信息从外部和外设流向大脑，而对外交互则是信息的双向流动，因此重点围绕信息的利用、交互和反馈来介绍脑机接口系统在不同场景下的典型应用以及系统在各方面性能上的需求。

图 48：脑机接口关键技术



数据来源：神经科学，东北证券

3.3.1.1 采集技术

植入式微电极是脑机交互的关键基础，被广泛应用于基础神经科学、脑疾病的诊断治疗以及脑机交互通信等领域。植入式微电极通过将以离子为载体的神经电信号转换为以电子为载体的电流或电压信号，从而获取大脑神经电活动信息。植入到大脑中的微电极可以高空间分辨率和时间分辨率方式，精确记录电极附近单个神经元的动作电位，从而实时监测大脑活动。传统的植入式微电极由金属和硅等硬质材料制备而成，形成了以密西根电极和犹他电极为主的硬质电极。随着微纳加工技术和电极材料不断发展，微电极趋向于柔性、小型化、高通量和集成化发展，形成了以微丝电极、硅基电极和柔性电极为主的多元化发展局面。

高性能柔性微电极对长期稳定慢性记录具有重要意义。硬质微电极和脑组织之间存在机械失配问题，会对生物体的正常活动造成继发性脑损伤，不适用于长时间的慢性实验。具有高生物相容性的柔性微电极器件有利于缓解免疫反应，提高信号质量，对实现大脑活动长期稳定的慢性记录具有重要意义。利用低杨氏模量生物材料和高性能界面材料制备柔性电极成为该领域的热点。

高通量微电极将为拓展全脑神经科学研究奠定重要基础。为了获取更丰富的神经元动态，神经微电极被要求同时记录尽可能多的单个神经元的电活动。现有植入式微电极通量远小于大脑神经元数目，发展新型高通量微电极，实现批量化高时空分辨率脑电信号采集，对于追踪神经环路活动以及解析全脑尺度的神经网络功能等基础神经科学研究至关重要。

多功能微电极有力促进多种激励方式综合调控。通过集成电刺激、药物注射和光刺激等功能，植入式微电极在读取生物体大脑活动信息的同时，还能调控生物体生命活动，实现生物体和外部设备的双向通信。研究多功能的神经微电极器件，搭建闭环系统，可实现癫痫等脑疾病的诊治和神经功能恢复等应用。

非植入式电极应用场景广泛，其不需要进行手术植入，直接放置于头皮上即可进行脑电信号采集。非植入式电极也称为无创电极，其安全无创特性更易被使用者接受，因此在非临床脑疾病诊疗、消费级脑科学应用等场景中得到了广泛的应用。改进的干电极是电极产业落地的主流选项。随着基于头皮脑电的脑机接口系统在便携性、快速应用及舒适度等方面的应用需求增长，电极的改进成为亟需解决的关键问题。传统的湿电极尽管信号质量好，但其专业的操作需求，耗时长，用后清洗等固有缺点无法规避。因此无膏的干电极技术逐渐发展起来以适应新的应用场景和需求。

基于金属材料或导电聚合物材料的多脚柱式/爪式干电极、基于导电纤维的刷毛式干电极、基于微机械加工工艺的微针电极及电容式电极等，在提高使用便捷性的同时，也通过材料改进和结构设计优化不断地降低电极与皮肤的接触阻抗，提高使用舒适度和应用性。凝胶半干电极具有潜在的广阔应用前景。干电极实现了脑机接口系统的便捷应用，但其与头皮的电连接仅靠微量的汗液，接触阻抗较高，且强烈依赖于压力，因此舒适度和信号质量及稳定性成为该项技术需要突破的技术难题。半干电极利用材料或结构特性，释放少量导电液到头皮，以降低电极与头皮的界面阻抗。基于材料体系的凝胶半干电极物理化学特性可调，通过材料组分配比的优化可兼顾电化学特性和机械特性，从而得到使用舒适度较好且信号质量可与湿电极匹敌的性能，是一种极具应用前景的电极技术。

随着集成电路技术的快速发展以及电路与神经科学融合研究的持续探索，脑信号采集技术朝着微型化、轻量化、高通量、分布式采集的方向不断前进。针对脑机接口的应用、算法、硬件以及范式的研究内容也逐渐丰富，植入式与非植入式脑机接口系统通过电极与采集硬件对脑信号进行采集、处理和解码，从而实现对脑科学基础理论、脑疾病以及脑控外设的探索与研究。

脑信号采集芯片是将脑信号直接转化为数字信号的核心硬件，也是脑信号读取与解码，脑部疾病诊断与调控所依赖的工具。针对脑部信号的生理特性以及应用场景，

在定制化脑信号采集芯片设计过程中存在诸多技术挑战。精密放大器是脑信号采集芯片中的核心模块，在脑机接口应用场景中需要满足多重技术参数要求。多个脑信号采集参数之间存在相互制约的关系，多参数的统筹优化是当前脑信号采集芯片设计的核心问题之一。

针对不同的脑机接口应用以及采集芯片面对的一些技术难题，国内外有许多团队提出了解决方案。例如针对采集过程中的电极间直流偏置引起斩波放大器输出饱和的问题，一种直流伺服反馈回路技术通过积分器将输出端的直流分量提取并反馈至输入端，有效抑制了电极间的直流偏置。对于采集芯片的超低功耗需求，有团队设计了基于反相器结构的超低压斩波放大器，非常适合植入式场景。针对芯片微型化的问题，放大器与 DAC 结合的数字-模拟混合反馈技术可大幅缩小采集芯片的片上面积。针对脑信号采集过程中的共模干扰问题，基于电荷泵 (Charge Pump) 的共模反馈技术通过对输入端的共模扰动信号进行动态反馈，能有效抵抗高达 15V 的共模扰动。

对于采集芯片的无线供电问题，线圈的无线电感传输技术被应用在植入式脑机接口芯片中，通过外部传输线圈以及中继线圈和片上耦合线圈，实现了对体内采集芯片的无线供电以及采集到的脑电信号无线传输。体表网络无线传输技术 (Body Area Network, BAN) 解决了无线供电时线圈难对准的问题，利用被试者的身体表面对采集到的信号以及能量进行无线传输，适用于可穿戴的脑机接口场景。在提升系统集成度方面，目前已有将信号采集、存储、以及基于 AI 的信号归类识别等模块集成在一起的脑机接口片上系统，实现了较高的系统集成度。针对于高通量植入式脑机接口芯片，有些公司设计了带有动作电位识别的高集成度采集芯片，该芯片与数千个柔性电极相结合，实现了对高通量脑信号的采集。

3.3.1.2 刺激技术

脑深部电极刺激 (Deep Brain Stimulation, DBS) 一种非常具有代表性的植入式电极刺激技术。DBS 通过植入体内的脑起搏器发放弱电脉冲，刺激癫痫、帕金森的病灶脑区，抑制病灶区神经元的异常无规则放电，进而抑制相关症状，使患者恢复自如活动和自理能力。传统的 DBS 调参需要基于微电极信号分析、刺激效果分析、影像定位、核磁分析等多技术手段选择治疗触点。借助脑机接口技术，脑内电极不仅具有单向刺激功能，还可进行周围神经元信号采集，以做到精准触点选择。

就技术发展进度看，目前可以做到信号采集之后由医生根据生物标志物和与患者的交互反馈进行触点选择，未来还将向自适应角度发展，自适应技术研发方向包括通过优化的信号处理方法实现自适应调控。如在机器学习、深度学习基础上对患者脑电数据进行预测分类，为医生提供分类结果以助于诊断，提升触点选择的精准度。在患者体态姿势发生变化导致电极与靶组织之间距离改变时，例如咳嗽、打喷嚏、深呼吸时，可根据诱发复合动作电位调控刺激以避免发生瞬时过度刺激。通过刺激参数空间拓展改善自适应调控，刺激参数空间包括触点、幅度、频率、脉宽的选择。目前在常用单极恒频刺激的基础上已开发交叉电脉冲模式、变频刺激及多触电不同频刺激技术，极大地拓宽了刺激参数空间，实现更好的症状调控。

依托多样生物标志物实现自适应刺激调控。当前国内外知名 DBS 厂商正在尝试基

于生物标志物实现自适应刺激调控，例如检测神经递质浓度，通过血清素、去甲肾上腺素、多巴胺脱氧血红蛋白度、氧合血红蛋白的浓度识别治疗效果并作为依据来动态调整刺激幅度。也有基于血流水平、范围或预定血流值矩阵等血流信息调节刺激幅度、脉冲宽度、脉冲率和占空比等指标。通过磁共振相融 DBS 技术实现自适应调控下的脑网络探索。现有磁共振兼容 DBS 技术解决了在强磁场下电极发热、移位及感应电流等安全隐患，使植入 DBS 的患者能在 3.0T 磁共振下进行长时间的同步刺激及扫描。在解决临床需求的同时，也使 DBS 成为探索刺激相关脑网络变化的直接媒介，通过功能磁共振解析刺激相关局部及整体脑网络改变，为新靶点的发现及适应症的拓展提供依据。

植入式视觉调控技术对盲人群体提高生活质量具有重大意义，目前研究主要集中在电刺激初级视觉皮层（V1）以获得人工视觉感知。全球绝大多数研究团队在开环视觉重建的研究中，研究方向逐渐从视网膜刺激向皮层刺激转移，这就需要进行刺激电极的植入。最新的实验已经植入了超过 10 块犹他阵列，通道数达到 1024。该系统还包括采集视频的摄像头，采集到的图像信息通过信号处理获得简单的二维灰度图像（目前还没有具有色彩的植入式人工视知觉输入），并据此刺激初级视觉皮层神经元。受试者通过植入电极可以在有限的视野范围内看到一些灰度调制的低分辨率点阵图像。目前的研究结果表明，用小电流电刺激初级视觉皮层神经元（V1 Neurons）会激活直径数百微米的皮层区域，从而获得简单的视觉知觉，称为光幻视（Phosphenes）。电刺激可以改变大脑皮层的信息流，影响到正常视觉观测内容。

由于电刺激是相对粗糙的刺激方式，因此获得的视觉感知也相对粗糙。目前研究致力于通过多个电极同时刺激，让受试者感知到具体图像或连贯动作。2020 年发表在 Science 上的研究结果表明，通过植入大规模 1024 通道电极并进行训练，可以使非人灵长类正确识别字母，辨识运动方向等。如何通过不同模式刺激增强受试者感知连贯形状的能力，并最大限度向其传递视觉信息依然是未来研究重点。目前的植入式视觉调控研究多为开环脑机接口系统，开环脑机接口系统难以实现精确刺激模型，且电刺激也难以与真实的视觉刺激保持一致，因此存在不可控风险且难以实现精细视觉输入。因此闭环视觉调控是未来重要的技术探索方向。

3.3.1.3 范式编码技术

大脑的各种思维与响应活动千变万化，且同时发生，因此很难直接从中准确解码特定类型的活动。在脑机接口系统中，用范式来表征对预定义的大脑意图的编码方案。范式定义为：在编码任务中，对希望识别的大脑意图用可检测、可区分、可采集的脑信号予以对应，从而实现对大脑意图的可识别输出。在过去的几十年中，出现了许多脑机接口范式，常见典型的有运动想象范式、稳态视觉诱发电位范式、P300 范式。这些范式往往根据是否有外部刺激和辅助而分为被动式和主动式范式。

视觉诱发电位刺激范式 P300 朝向界面布局优化、人脸图像拼写和融合物理刺激方向发展。传统的视觉 P300 电位刺激范式下，拼写器允许受试者通过闪烁不同的行和列来选择目标，但没有考虑两个相邻符号连续闪烁对结果的影响。近年有大量研究针对 P300 电位刺激范式的拼写界面布局开展优化工作，有效消除了相邻符号闪烁带来的影响。一些研究发现面部符号可以比传统 P300 字符拼写范式诱导更高的 P300 电位。因此许多研究尝试用人脸图像代替数字或字母符号，使每个符号在以一

定频率闪烁时都会变成人脸图像，而不是简单的颜色或大小变化，实现了 P300 电位刺激范式的解码性能提升。最近也有研究发现，在视觉 P300 电位刺激范式中添加其他形式的物理刺激可以提高使用者的表现，例如使用偏光镜增强刺激、基于积极情绪的视听组合刺激、引入声音和视频刺激等方式。因此将 P300 电位与其他物理刺激融合的范式研究也是近年的热点。稳态视觉诱发电位（Steady-State Visual Evoked Potentials, SSVEP）刺激范式朝向更高效、更舒适和更自然发展。

运动想象（Motor Imagery, MI）范式朝向更精细发展。运动想象是一种非常重要的主动式脑机接口范式，用于识别大脑对四肢和舌头的运动意图。其无需外界条件刺激和明显的动作输出就能诱发大脑感觉运动皮层的特定响应。现已广泛应用于基于脑机接口的假肢、机械臂和轮椅等设备控制、字符拼写及临床中风康复治疗等场景。基于运动想象范式的脑机接口已经发展多年，经过数十年的研究，大肢体部位的 MI 控制已经基本发展成熟，而对更细微运动做出想象并有效识别（例如不同手指的伸缩、握拳、不同手势的运动想象等）是运动想象范式编码的发展方向。

3.3.1.4 解码算法技术

卡尔曼滤波器是当前植入式脑机接口系统的主流解码方法。以运动控制为例，早期的植入式脑机接口解码大都使用维纳滤波器线性解码系统。此类解码系统不包含运动学过程模型，而是将群体神经元的反应作为输入，将空间坐标内的运动速率作为输出，通过最优线性估计的方法进行解码。早期很多脑机接口实验室都用该方法进行解码。后来，为满足控制过程中的解码连续性需求，需要有运动模型作参考以修正和优化解码器输出，卡尔曼滤波器成为当前的主流解码方法，其在离线、实时以及临床试验中都得到了广泛的应用。

卡尔曼滤波的优点是算法简单，而且可以不需考虑神经元具体编码内容即可解码，因此可以实时快速解码。其缺点在于解码效果一般，且每次实验之前都需较长的校准时间。另外，卡尔曼滤波解码的系统鲁棒性相对较差。为解决这些问题，国际上提出了很多方法，其中最具前景的方法主要包括类脑解码器设计和神经学习。神经学习提供新的解码思路。当前还有一种前沿的脑机接口解码方法是通过训练大脑进行学习来使用脑机接口，即神经学习（也称脑机学习）。脑机接口系统中存在两个学习系统，一个是解码器的机器学习，另外一个就是具有强大学习能力的神经系统。脑机接口初期的实验都体现了大脑学习本身的重要意义，但如何让大脑学会使用脑机接口的解决方案尚不完善。

脑机接口系统在使用过程中，闭环控制的练习可以导致神经元为适应用户的运动系统而发生变化。因此，闭环过程中的解码器与开环时的解码器可能完全不同，结果表明提供快速的反馈比过滤错误更为重要，因此诞生了改进闭环性能的技术，一般被称为闭环解码器适应（Closed-Loop Decoder Adaptation, CLDA）。此类方法根据闭环脑机接口使用期间记录的数据实时改进解码器，让解码器根据用户当前神经信号的性质来决定解码器的结构。此外，用户的神经系统也在实时学习如何应用这个解码器。两者的相互结合以及相互促进得到了一个“脑机双学习”的融合式脑机接口系统。此系统可以在神经信号不稳定时依然输出稳定的表现，且仅需少量校准即可即插即用，同时鲁棒性极高，在适应新的应用场景时有同时保留已学控制技巧并探索新控制方式的特性，因此极大的提高了脑机接口系统在实际应用中的可能性。

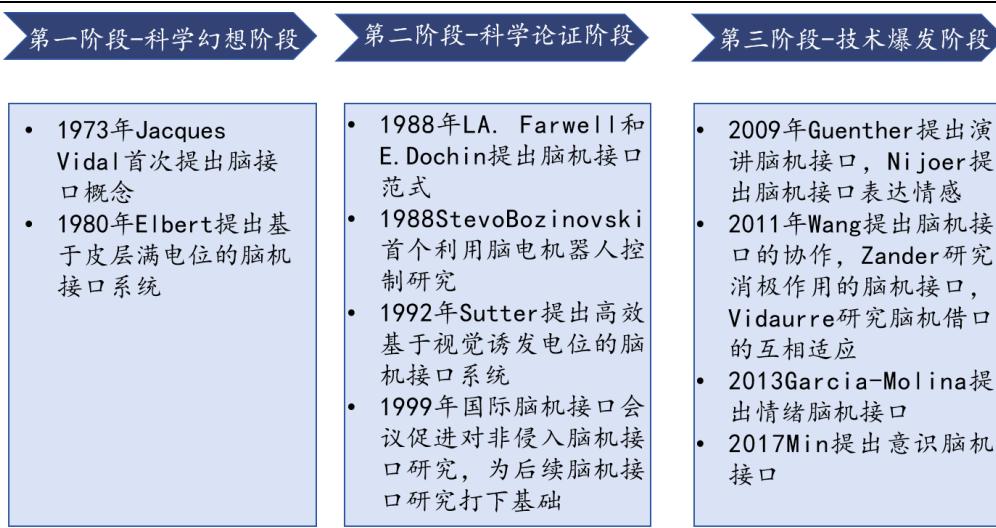
分解算法是非植入式脑机接口系统的主流解码算法。分解算法广泛应用于脑机接口系统的去噪与意图解码。分解算法通常使用矩阵分解或提取空间滤波器来增加不同类别意图的解码可分离性。大多数分解算法都是为特征提取而设计的，矩阵特征分解后通常需要连接到分类器。

独立成分分析 (ICA) 是使用广泛的分解算法之一。ICA 一方面可对不同源信号进行特征分析，另一方面还可用于去噪（例如去除眨眼成分、伪影信号等）。在解码脑意图时，不同脑机接口范式的分解算法存在差异。运动想象范式解码多采用通用空间模式 (CSP) 及衍生算法。CSP 可最大化不同分布的方差信号，例如对左右手运动想象进行分类。在 CSP 基础上逐渐衍生出滤波器组 CSP (FBCSP)、提议判别滤波器组 CSP (DFBCSP)、临时约束的稀疏组空间模式 (TSGSP) 等。稳态视觉诱发电位 (SSVEP) 解码多采用典型相关分析 (CCA) 及衍生算法。CCA 算法有效解决了以往非空域分解算法难于处理的导联挑选问题。近十年学者提出诸多 CCA 改进算法，例如滤波器组 CCA (FBCCA)、任务相关成分分析 (TRCA)、集成 TRCA (eTRCA)、任务相关成分分析算法 (mTRCA、TDCA 等)。视觉 P300 电位解码算法依托 xDAWN 算法和 DCPM 算法。目前有增强 P300 诱发电位的 xDAWN 算法以及将空间模式提取和模式匹配结合的 DCPM 算法。

3.3.2. 发展历程：三大阶段及脑机接口行业促进政策

脑机接口技术的研究可以追溯到二十世纪七十年代，近五十年的发展经历了三个阶段，分别是科学幻想阶段、科学论证阶段和技术爆发阶段。目前，脑机接口技术正在第三个阶段中蓬勃发展。

图 49：国外脑机接口发展阶段



数据来源：中国信通院报告，东北证券

第一个阶段为 1970-1980 的科学幻想阶段。1977 年，Jacques J. Vidal 开发了基于视觉事件相关电位的脑机接口系统，通过注视同一视觉刺激的不同位置实现了对 4 种控制指令的选择；1980 年，德国学者提出了基于皮层慢电位的脑机接口系统。然而，由于技术限制，第一阶段的研究并没有取得明显的进展。

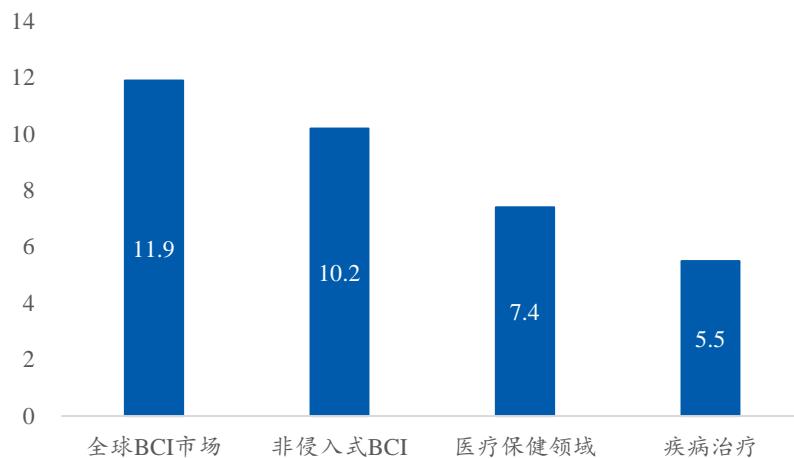
第二阶段为 1980 年代末至 1990 年代末的科学论证阶段。美国和欧洲的少数先驱们研发了首个实时且可行的脑机接口系统，并开拓了脑机接口领域。1988 年，L. A. Farwell 和 E. Donchin 提出了著名的脑机接口范式，即“P300 拼写器”，该系统有望帮助严重瘫痪患者与环境进行通信和交互。脑机接口研究的主要驱动力是期望将其用作运动障碍患者的新型辅助技术，特别是对于那些可能无法使用其他替代方案的患者。同年，Stevo Bozinovski 等人报道了利用脑电 α 波控制移动机器人，这是首个利用脑电进行机器人控制的研究。在这个时期，研究者们还开发了基于感觉运动节律的脑机接口系统，其中根据操作性条件作用开发了用于控制一维光标的脑机接口，利用该方法训练用户自我调节其感觉运动节律的幅度，以实现向上或向下移动小球。同时，Gert Pfurtscheller 等人开发了另一种基于感觉运动节律的脑机接口，用户必须明确地想象左手或右手运动，并可以通过机器学习将其转换为计算机命令，这定义了基于运动想象的脑机接口。1992 年，Erich E. Sutter 提出了一种高效的基于视觉诱发电位的脑机接口系统，利用从视觉皮层采集的视觉诱发电位识别用户眼睛的注视方向来确定选择拼写器中哪个符号。除了一些著名的研究外，还有一些其他的研究也受到了关注。比如，基于事件相关电位和稳态视觉诱发电位的脑机接口系统，可以让用户通过选择意图指令或控制物理设备。此外，1999 年的国际脑机接口会议促进了欧美学者对非侵入式脑机接口研究的深入探索，为后续的脑机接口研究打下了坚实的基础。

第三阶段为 21 世纪以来的技术爆发阶段。脑机接口研究的规模和范围急剧扩大，吸引了越来越多的研究人员参与。新型的脑机接口实验范式相继涌现，如听觉脑机接口、言语脑机接口、情感脑机接口以及混合脑机接口。先进的脑电信号处理和机器学习算法也被广泛应用于脑机接口研究，如共空间模式算法和 xDAWN 算法等。此外，新型的脑信号获取技术也得到了广泛应用，如功能磁共振成像测量的血氧水平依赖信号和功能近红外光谱测量的皮层组织血红蛋白浓度。

脑机接口应用最初主要集中在医学领域，但如今在非医学领域的应用也取得了迅速发展。例如增强正常个体感知觉和认知、娱乐游戏、汽车和机器人行业等。随着脑机接口人因工程的提出，从用户体验、心理状态和用户训练等层面提高了脑机接口的满意度和实用性，这将进一步推动其在各个领域的应用。随着人工智能的发展，未来的脑机接口技术也将更具智能化，实现多模式人机交互场景。已有研究证明，通过深度学习、解码算法等技术，脑机接口系统能够准确的识别和解码脑电信号，并作出精准的控制和反馈。

根据麦肯锡《脑机接口标准化白皮书 2021》，2019 年全球脑机接口市场规模约 12 亿美元，预计到 2027 年达 37 亿美元，CAGR 为 15.5%。麦肯锡预测未来 10 到 20 年，全球脑机接口产业将产生 700-2000 亿美元经济价值。

图 50：全球脑机接口市场及发展方向规模（亿美元）



数据来源：脑机接口标准化白皮书 2021 版，东北证券

脑机接口技术赋能传统产业，带动产业增量发展。据 2017 年硅谷 Live 对脑机接口未来 5 年的市场规模数据显示，在医疗健康产业方面，主要应用包括脑机接口设备（EMG/EEG）、CESI 大脑检测系统、ADHD 脑机接口反馈治疗，预计规模分别可达 25 亿美元、120 亿美元、460 亿美元；在教育产业方面，可应用于学生记忆力训练以及学科培训等场景，预计规模可 2500 亿美元；在游戏产业方面，可通过虚拟结合方式实现思维控制设备及游戏角色，预计规模可达 1200 亿美元；在智能家居产业方面，可与 IoT 等技术结合实现用意念控制家用电器等，预计规模可达数 10 亿美元。脑机接口在军事方面的潜力不可低估，如脑机接口技术已被美国军方用于训练士兵的认知和决策能力；美国国防部高级研究计划局（DARPA）对脑机接口研究投入较大，来达到美军更加快速、高效、准确地完成对战场态势的正确认知。

3.3.3. 脑机接口海内外政策与“一体两翼”战略布局

美国政府于 1989 年率先提出脑科学计划，并把 20 世纪最后 10 年命名为“脑的 10 年”。奥巴马政府于 2013 年 4 月 2 日宣布“脑计划”（BRAIN Initiative，通过推进创新神经技术进行大脑研究），旨在探索人类大脑工作机制、绘制脑活动全图、推动神经科学研究、针对目前无法治愈的大脑疾病开发新疗法。美国政府公布“脑计划”启动资金逾 1 亿美元，后经调整，计划未来 12 年间共投入 45 亿美元。2014 年 2 月，美国政府呼吁进一步采取行动推进 BRAIN 计划，并将该计划 2015 财年预算提高至 2 亿美元；2014 年 6 月 5 日，美国国立卫生研究院（NIH）的 BRAIN 小组发布了《BRAIN 计划 2025：科学愿景》报告，详细规划了 NIH 脑科学计划的研究内容和阶段性目标。2018 年 11 月 2 日，NIH 宣布将进一步加大对“脑计划”研究项目的投资，将为超过 200 个新项目投资 2.2 亿美元，这使得 2018 年对该计划的支持总额超过 4 亿美元，比 2017 年支出高 50%。2019 年 10 月 21 日，美国 BRAIN2.0 工作组发布《大脑计划与神经伦理学：促进和增强社会中神经科学的进步》报告，对其 5 年前提出《BRAIN 计划 2025：科学愿景》实施情况和未来发展进行了梳理和展望。

除政策支持以外，近年，美国出台了一系列限制脑机接口技术出口的措施，加强技术管控。2018 年美国商务部发布《出口管制法案》，拟将 14 种新兴基础技术列为管

制清单，脑机接口包含在内。2021年美国商务部发布《关于拟制定脑机接口技术出口管制规则的通知》，对脑机接口出口管制细则征询意见，征求的意见主要围绕 12 个问题，设计脑机接口技术、应用领域、产业发展情况、伦理安全、风险收益等方面。2023 年 2 月美国商务部召开脑机接口专题研讨会，就脑机接口的潜在用途和对国家安全的影响进行讨论，主要关注脑机接口的潜在用途及其对国家安全的影响。除美国外，欧盟、日本、韩国、澳大利亚等国也相继推出了相关的脑计划，大力开展脑机接口技术发展规划布局，推出了针对该技术的许多重大研发计划及典型投资项目。

表 4：中美脑机接口相关政策

时间	政策	部门	政策内容
2016	《中国脑计划——脑科学与类脑科学研究院》	中国政府	以探索大脑秘密并攻克大脑疾病为导向的脑科学研究所和以建立并发展人工智能技术为导向的类脑研究。
2017	《“十三五”国家基础研究专项规划》	科技部等四部委	提出了脑与认知、脑机智能、脑的健康三个核心问题，“一体两翼”的布局
2021.9	《科技部关于发布科技创新 2030—“脑科学与类脑研究”重大项目 2021 年度项目申报指南的通知》	科技部	涉及 59 个研究领域和方向，国家拨款经费预计超过 31.48 亿元人民币
2023.9	《元宇宙产业创新发展三年行动计划（2023-2025 年）》	工业和信息化部等五部门	提出“拓展元宇宙入口，加速 XR 头显、裸眼 3D 等沉浸显示终端的规模化推广，支持脑机接口等前沿产品研发。”
1989	脑科学计划	美国政府	把 20 世纪最后 10 年命名为“脑的 10 年”
2013.4	宣布“脑计划”（Brain Initiative）	奥巴马政府	将该计划 2015 财年预算提高至 2 亿美元
2014.6	《Brain 计划 2025：科学愿景》报告	美国国立卫生研究院 Brain 小组	详细规划了 NIH 脑科学计划的研究内容和阶段性目标
2018.11	加大对脑计划研究项目的投资	NIH	使 2018 年对该计划的支持总额超过 4 亿美元
2018	出口管制法案	美国商务部	将 14 中新型基础技术列为管制清单，包括脑机接口在内
2021	《关于拟制定脑机接口技术出口管制规则的通知》	美国商务部	对脑机接口出口管制细则征询意见，征求的意见主要围绕 12 个问题。（设计脑机接口技术、应用领域、产业发展情况、伦理安全、风险收益等方面）
2023.2	召开脑机接口专题研讨会	美国商务部	就脑机接口的潜在用途和对国家安全的影响进行讨论，主要关注脑机接口的潜在用途及其对国家安全的影响

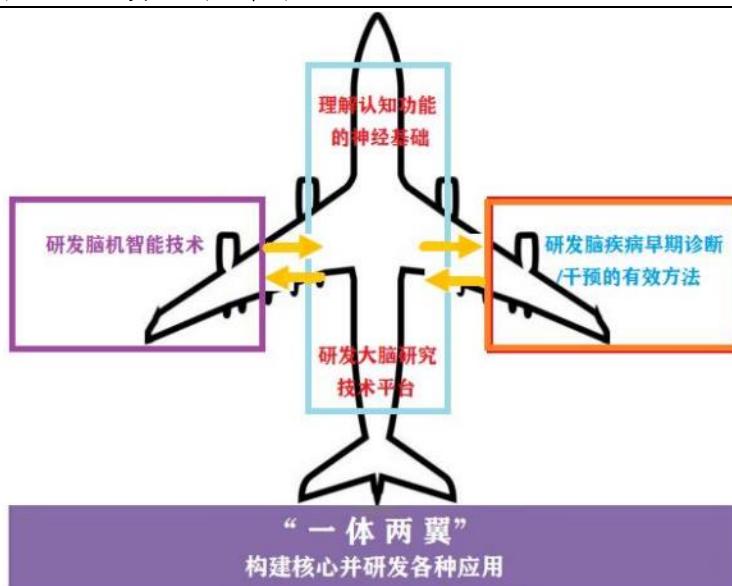
数据来源：各政府官网，东北证券

我国《“十三五”国家科技创新规划》中将“脑科学与类脑研究”列入科技创新 2030 重大项目。在“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要中，人工智能和脑科学为国家战略科技力量，规划中也进一步指出需要加强原创性和引领性科技攻关，集中优势资源攻关科技前沿领域，其中类脑计算和脑机融合技术研发是重要领域之一，而脑机接口技术正是脑与机智能的桥梁和融合的核心技术。此外，国务院发布的《“十四五”国家知识产权保护和运用规划》、《“十四五”国家老龄事业发展和养老服务体系建设

规划》、《“十四五”国民健康规划》等政策中均提出加强脑科学和类脑科学相关研究。2021年9月，科技部发布了《科技部关于发布科技创新2030——“脑科学与类脑研究”重大项目2021年度项目申报指南的通知》，涉及59个研究领域和方向，国家拨款经费预计超过31.48亿元人民币。2023年9月8日，工业和信息化部等五部门联合发布《元宇宙产业创新发展三年行动计划（2023-2025年）》，提出“拓展元宇宙入口，加速XR头显、裸眼3D等沉浸显示终端的规模化推广，丰富基于手机、计算机、电视机等终端的元宇宙应用，支持脑机接口等前沿产品研发。”在国家层面频频出台一系列规划政策后，地方也重视并出台脑科学和类脑科学的相关政策，目前，我国有十余个省市出台了脑科学和脑机接口相关的政策。

中国脑计划——脑科学与类脑科学研究（Brain Science and Brain-Like Intelligence Technology）自2016年启动，包括两个方向：以探索大脑秘密并攻克大脑疾病为导向的脑科学研发和以建立并发展人工智能技术为导向的类脑研究。2017年四部委联合印发《“十三五”国家基础研究专项规划》明确提出了脑与认知、脑机智能、脑的健康三个核心问题，“一体两翼”的布局。作为“一体两翼”布局的“一翼”，脑机智能的关键技术研发和产业发展备受重视。脑机接口技术是脑与机智能的桥梁和融合的核心技术，也可能是脑重大疾病诊治的新手段，同时也是研究大脑的一种工具。在十四五规划和2035年远景目标纲要中，人工智能和脑科学为国家战略科技力量，其中类脑计算和脑机融合技术研发是重要领域之一，而脑机接口技术是脑机智能融合技术的关键之一。

图 51：我国“一体两翼”战略布局



数据来源：中国信通院报告，东北证券

3.4. 脑机接口国内外研究及应用进展

历经 50 多年的研究，当前脑机接口正处于第三个发展阶段——技术爆发期，美国、欧盟、日、韩、澳大利亚等多国政府、科研机构和企业都已加速布局脑机接口，抢占全球脑科学竞争战略高地。美国是最早提出脑科学计划及其行业发展规划的国家，也是政府资金投入最多，技术发展水平最高的国家。中国相对于美国等西方国家对脑机接口技术的研究起步较晚，但重视程度不亚于发达国家，近两年已经将此技术上升为国家战略。

在全球范围内，美国在脑机接口的理论、方法和实践方面具有明显的领先优势。侵入式脑机接口研究主要集中于美国，已成功开发出多种外周神经电极、三维电极、柔性电极、环形电极以及光遗传技术并将其应用于脑机接口。相比之下，欧盟和欧洲国家更注重神经疾病研究，主要关注非侵入式脑机接口。日本也主要关注非侵入式脑机接口，并倡导脑机接口和机器人系统的集成。

3.4.1. Neuralink

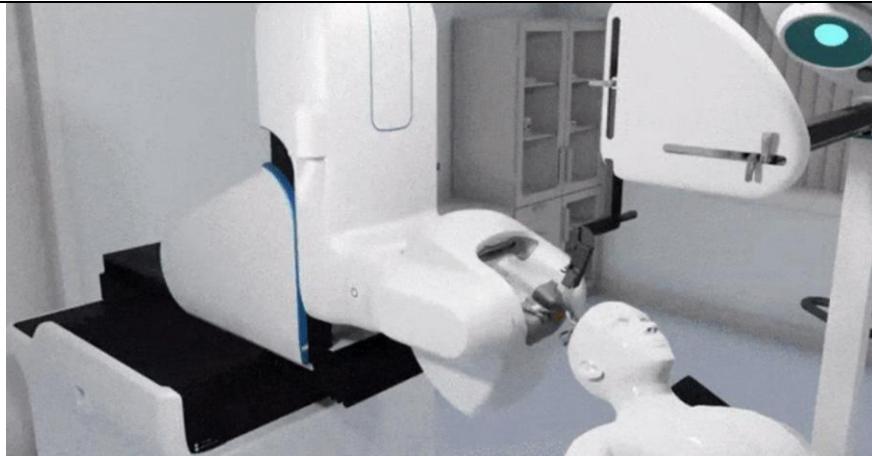
Neuralink 是由埃隆·马斯克在 2016 年创办的神经技术公司，致力于开发侵入式脑机接口。在 2019 年，Neuralink 展示了其第一个原型机产品，该系统包括了插入大脑的超薄探针、含有神经元大小聚合物线的芯片、神经外科手术机器人以及能够处理神经元信息的高密度电子系统。并在猪身上进行了试验，研究人员将电极植入猪的体感皮层，使他们能够测量感官活动。在 2021 年 4 月，Neuralink 发布了名为“MindPong”的视频，在视频里一只被植入了两个 N1 设备的恒河猴使用操纵杆对屏上的光标进行大脑控制。Neuralink 已于 2023 年 5 月获得了美国食品药品监督管理局 (FDA) 的批准，预计将在 2023 年启动其首次人体临床试验，将在四肢瘫痪的患者身上进行。在此试验之前，没有类似的柔性电极技术路径得到过批准。

最新的 N1 植入物具有生物兼容性外壳，可承受比人体严酷数倍的生理条件，由小型电池供电，可从外部进行无线充电，并且采用了先进的、低功耗的芯片和电子处理神经信号。N1 植入物通过分布在 64 根柔性超细丝线上的 1024 个电极记录神经活动，这些丝线能过最大限度的降低植入期间和术后的损伤。神经外科手术机器人头部包含 5 个摄像系统的光学元件和传感器以及光学相干断层扫描 (OCT) 系统的光学元件，能够可靠、高效的将螺纹准确的插入所需的位置。

Neuralink 这一侵入性方案的优势是，由于将柔性电极直接插入接触大脑皮层中，理论上可以获得最清晰和准确的的脑电信号，但此类技术的操作难度大，最大风险为感染、出血和组织损伤。

Neuralink 的这一试验正式宣布了侵入式脑机接口技术已介入人体临床。如果取得成功，此类脑机接口技术有可能彻底改变如今的治疗方法，不仅是中风、瘫痪、运动退行性疾病，还包括了阿尔兹海默症、帕金森氏症等其他类型的精神和脑部疾病。这标志着侵入式脑机接口技术的进一步成熟，加速脑机接口行业的产业化进程。

图 52: 脑机接口国内外研究成果



数据来源：中国信通院报告，东北证券

3.4.2. 脑虎科技

脑虎科技是国内知名的柔性脑机接口生命科技公司，是在体神经电生理整体解决方案的引领者。公司以柔性电极为基础，结合超高通量数据采集和处理技术、多光子等技术，提供动物脑机接口研究整体解决方案。依托强大的科研力量，脑虎科技在侵入式脑机接口领域已完成核心技术突破及产品器材制造，独创“微创植入式高通量脑机接口技术”，开发出免开颅、可避免血管、可自愈的电极微创技术，大幅减少植入创伤；以及“超柔性超薄神经电极”，大幅提升了器件在体工作寿命。目前已经形成五大产品系列（高通量神经信号采集系统、柔性深部电极、皮层电极、集成式BCI、算法云平台），柔性电极技术及产业化程度国内领先。

经过两项动物科研试验，脑虎科技已实现脑机接口系统全链条的 100%自主研发。经过两年多的发展，脑虎科技在 2023 世界人工智能大会上发布了“丝蛋白神经光电极”和“类蚊口器仿生电极”两项学术成果，两项动物科研实验以及三项临床科研突破在内的共 7 项科研成果。“丝蛋白神经光电极”实现了大脑神经的解析和调控，不仅能保持高质量高通量的信号采集，还具有较好的光耗控制，提升生物性能。“类蚊口器仿生电极”实现了电极在硬脑膜外的微创植入，与传统的植入方式相比更为便捷且损伤更小。脑虎科技公布的两项动物科研试验，第一项是通过植入第二代脑机接口产品集成式 BCI 和 256 通道皮层电极拉布拉多犬完成了运动轨迹的高精度解码试验，第二项是通过植入高通量的皮层电极和集成式 BCI 实现了恒河猴打游戏。

脑虎科技已推出两款柔性电极植入手术机器人，将在今年 8 月正式交付客户。两款机器均可实现电极植入手术的全自动化。FlexShuttle 面向医疗市场，搭载了多重精度视觉模块和深度学习算法，兼容钨丝和蚕丝两种电极植入手术方式，能实现 3.5 微米视觉分辨率及 10 微米的机械臂控制精度。FlexShuttle Mini 则主要面向科研机构的动物实验，具有易操作、可定制、高精度等特点。对标 Neuralink 手术机器人，加速实现国产化替代。

图 53：脑机接口国内外研究成果



数据来源：中国信通院报告，东北证券

3.4.3. BCI 的多领域科研进展

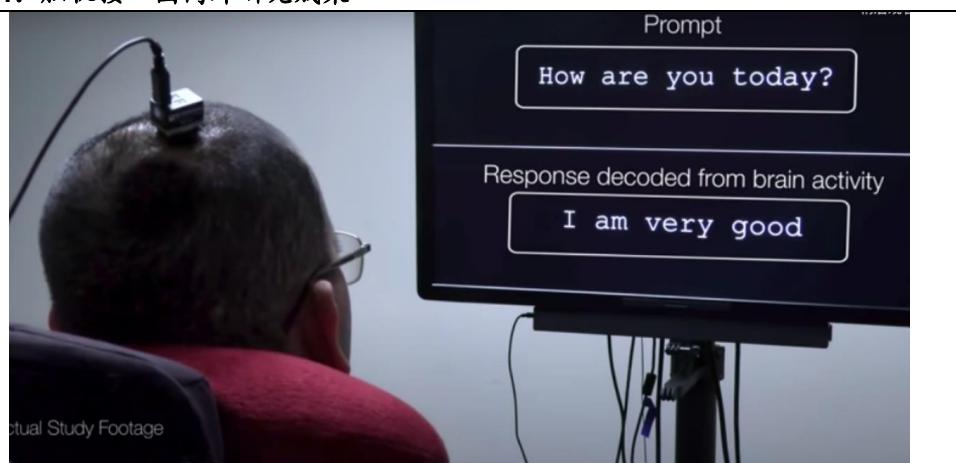
鲁汶大学神经和心理学实验室研究发现，大多数基于 BCI 的虚拟环境 (VE) 导航研究采用的是以 P300 和稳态视觉诱发范式 (SSVEP) 为主的视觉范式，通过视觉刺激诱发反应或感觉运动节律的变化。这些范式的优势是稳健且准确，但与想象运动 (MI) 相比，在 VE 导航领域缺乏直观性和舒适性。但由于在 MI 范式中通过干电极记录的脑电图提取用户的运动命令过程中一直存在 MI 解码器性能不佳的问题，阻碍了更先进的 VE-MI 应用的开发。

针对以上两个问题，鲁汶大学研究团队在近期研发了一款为用户提供虚拟沉浸式体验的 BCI 导航应用程序——基于 8 干电极脑电图设置的新型 MI-BCI 应用程序。用户可以利用该程序在谷歌街景 (Google Street View) 中进行探索和导航。其设计了以中层控制方案为主的系统，旨在在用户控制自由度和导航效率之间提供平衡的权衡，弥补由于系统设计使用有限数量的干电极和使用错误控制策略而导致解码器性能不佳、导航效率不高的问题。经过离线和在线实验，该应用程序的成功率超过了 80%，证实了 MI 控制的 BCI 导航系统的可行性。研究提出的系统与现有的 VE 导航系统相比，可以为用户提供更高程度的沉浸感和趣味性，在谷歌街景中，用户可以参观各类场景。但解码器精度较低（参与者屈膝-休息和左-右平均解码精度约为 80% 和 63%）的问题仍然有待改善。这项研究建议在未来的游戏和 VR 应用中使用 MI-BCI，用于暂时或永久失去肌肉控制能力的消费者和患者。

加州大学旧金山分校/加州大学伯克利分校等机构在《Generalizable spelling using a speech neuroprosthesis in an individual with severe limb and vocal paralysis》一文中，扩展了在 2021 年发布的在拼写 BCI 领域具有里程碑式意义的，从大脑神经信号中直接解码完整单词和句子的临床研究成果。在此前的研究中，研究团队开发了一种言语神经假体，成功地实现了将一名有言语功能障碍的瘫痪患者的皮质信号实时转换成文字显示在屏幕上，帮助他再次“说话”。

在此次的研究中，研究团队证明了通过实时解码默念北约音标中 26 个英文字母代词码（如 Alpha 代表 A, Beta 代表 B)可以帮助同一名患有瘫痪和构音障碍的患者高度准确、快速的拼写单词。在 2021 年的试验中，研究团队的解码算法可以识别 50 个词汇，但此次扩展到了 1152 个词汇，实现各种常见句子的交流，并且改进了解码所用的深度学习和语言建模技术，使得准确率和解码速度比此前试验更高、更快，中位字符错误率为 6.13%，解码速度为每分钟 29.4 个字符。在之前的研究中，中位字符错误率和解码速度分别为 25.6% 和每分钟 15.2 个字符。在离线模拟中，研究团队发现此种方法也适用于到包含超过 9000 个单词的大型词汇库，中位字母错误率为 8.23%。这些结果展现了临床可行性，可以有效的利用构音障碍患者在默念时记录的神经信号来驱动言语神经假体。此类技术展示的基于拼写的方法和建模技术可以帮助未来在与语言相关的神经科学的研究和 BCI 开发。

图 54：脑机接口国内外研究成果

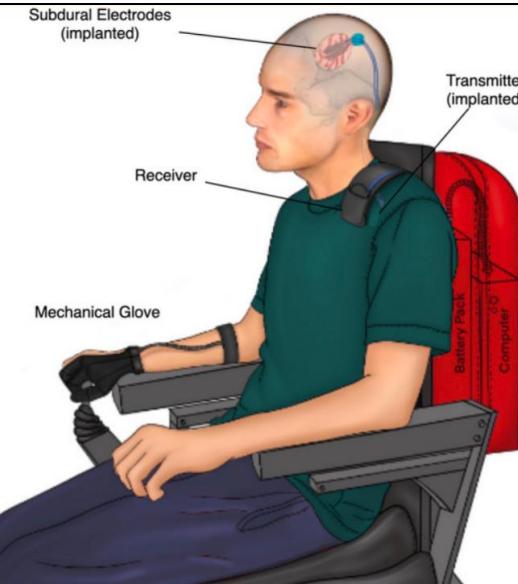


数据来源：中国信通院报告，东北证券

美国哈佛大学/麻省理工大学/迈阿密大学等多所院校研究发现，BCI 可以通过使用大脑信号控制假肢或触发功能性电刺激来恢复瘫痪患者运动的独立性。目前已经有多项研究在实验室和家庭中成功实施了这项技术，但便携性、系统配置的简便性和护理人员设置时间过长仍然是限制在家庭环境中实施的挑战。对此，美国多所院校联合开发了一种便携式模块化的家用 BCI 平台并在颈髓损伤患者身上实验。

这一 BCI 平台包括一个美敦力公司的 Activa PC+S 发生器、一台固定在受试者轮椅背面的小型计算机、一部定制的手机应用程序，以及机械手套作为末端执行器。为了量化“在家”实施的可行性和平台性能，试验测量了系统的设置时间、长期的解码准确性以及手机应用程序和微信计算机之间的蓝牙延迟。根据试验结果，受试者护理人员的平均准备时间为 5.6 ± 0.83 分钟，经过训练的运动想象分类器的 14 个月中位准确度为 $87.5 \pm 4.71\%$ ，手机应用程序和微型机的平均蓝牙延迟为 23 ± 0.014 ms。试验展现了这一家用 BCI 平台具有便携的系统、直观的设计和简单的配置。受试者可以友好的对移动用户界面进行操作，无需技术人员在家进行设置。将 BCI 系统转换为更便携的家用设备的可行性与日俱增，随着更多辅助和康复设备的出现，模块化平台可以为 BCI 用户提供更多功能。

图 55: 脑机接口国内外研究成果



数据来源：中国信通院报告，东北证券

3.5. 脑机接口产业链

在脑机接口产业链方面，为了实现脑电信号的预处理、信号通信以及部分信号处理环节，整个产业链可以分为上游、中游和下游三个环节。上游包括脑电采集设备（如非侵入式电极和侵入式微电极）、BCI 芯片、处理计算机/数据集和处理算法、操作系统级分析软件和外部嵌套等。中游主要包括脑机接口产品提供商。下游则包括医疗保健、教育培训、游戏娱乐、智能家居、军事国防等各种应用领域。

全球脑机接口产业链发展还处于初期阶段，其上游设备尚未实现标准化量产，自研 BCI 芯片和算法是核心技术壁垒。在国内市场上，脑机接口产业链发展还不够完善，芯片等环节发展也较为薄弱，当前主要以德州电气 (Texas Instruments, TI)、意法半导体 (STMicroelectronics) 等国际大厂为主。BCI 芯片的设计涵盖了模拟、数字、通信等多种功能，其技术门槛在于模拟电路设计挑战大、低功耗要求高，且具备无线能量传输能力。如今，BCI 芯片主要有两种方案——通用方案和专用 ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) 方案。通用方案适用于多种应用场景，而专用 ASIC 方案则针对特定的应用场景进行设计，因此具有更高的性能和功耗优化。一些企业和高校已开始自主设计脑机，接口专用 ASIC 芯片，例如，Neuralink、布朗大学和复旦大学等，这些芯片设计和制造都比较复杂。

脑机接口技术是一种交叉学科，需要涵盖多个学科领域的人才，包括神经学、人工智能、材料学、生物学。然而，在国内外高校中，并没有开设与脑机接口相关的专业课程，这导致脑机接口领域人才的匮乏。除此之外，脑机接口的信号采集需要各种材料和零部件，以及芯片算法等软硬件相结合的技术，技术要求非常高。因此，技术壁垒主要可分为人才壁垒和核心零部件壁垒。以美国为代表的西方国家在早期对脑机接口技术的研究中，投入了大量的人力、财力和物力，也涌现出了许多行业独角兽，如 Neuralink、Synchron、BrainGate 等。与之伴随的也是不断增高的技术壁垒。目前，脑机接口平台的核心零部件仍然依靠进口，国产化水平有待提高。为了在脑机接口领域赶上并超越西方国家，中国需要加强核心零部件的国产化率。2021

年10月26日，美国商务部工业和安全局(BIS)出台新规，拟向出口管理条例中进一步明确新的管制项目，其中就包括脑机接口技术。此次美国进一步加强脑机接口技术的出口管制，将对中国的脑机接口产业发展造成影响。因此，中国提升核心零部件的国产化率势在必行。

图 56：脑机接口产业链示意图



数据来源：中国信通院报告，东北证券

3.6. 脑机接口与神经调控 BDS

3.6.1. 脑深部电刺激与神经电刺激的概念和基本原理

神经调控可以将电极置于大脑皮质硬膜外，例如常用的大脑皮质运动区刺激；也可借助脑立体定位仪插入脑深部，称为深部电刺激（Deep Brain Stimulation, DBS）。刺激的目标可以针对中枢神经系统（脑或脊髓）的特定部位，也可以针对周围神经。神经调控所用的能量多种多样，电刺激可用直流电或脉冲电流。据估算，目前神经调控产业已占据所有神经科技市场份额的60-70%。几年之内全球神经调控的市场额度可能突破百亿美元。

从广义上理解脑机接口的概念范畴，那么如今应用最广泛的脑机是人工耳蜗，在这一赛道也诞生了国内在传统电极方面实力较强的公司诺尔康。传统的DBS（深部脑刺激，又被称为脑起搏器）、RNS（反应性神经刺激）等神经调控也可纳入广义的脑机接口范畴。

上一代以脑起搏器为代表的神经调控技术，发展已日臻成熟，国内也诞生了如品驰医疗的估值超150亿元、年销售额数亿元的独角兽。在国内充足临床资源的支持下，DBS（深部脑刺激）的适应症也逐步从帕金森病拓展至难治性抑郁症、自闭症等精神疾病。

与此同时，下一代脑机交互、闭环的脑机接口技术蓬勃发展，预计2023、2024年国内陆续会有公司获批人体临床试验。从发展阶段来看，目前国内侵入式脑机接口公司多处于A-B轮融资阶段，相对比较早期。作为平台型治疗技术，脑机接口公司未来也有可能将一些适应症研发权限 license out 给神经调控相关公司共同开发，以加

速在临床的研发与应用。

图 57: DBS 发展历程图

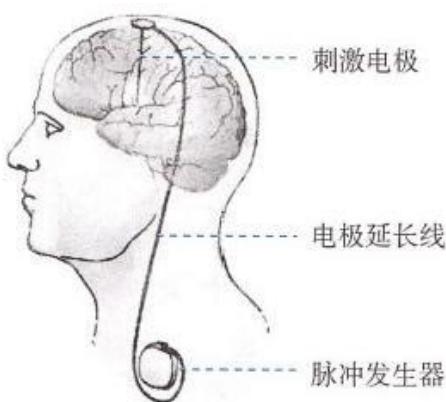


数据来源：中国信通院报告，东北证券

脑深部电刺激（DBS）是将外源性的电脉冲通过置入脑内特定区域（靶点）的电极给与电能刺激，设置频率、强度、脉宽和刺激模式的参数组合，调控该区域及其关联网络的神经活动，从而达到调节脑功能的目的。可植入性脑深部电刺激器是由刺激电极、电极延长线和电脉冲发生器组成的装置系统。

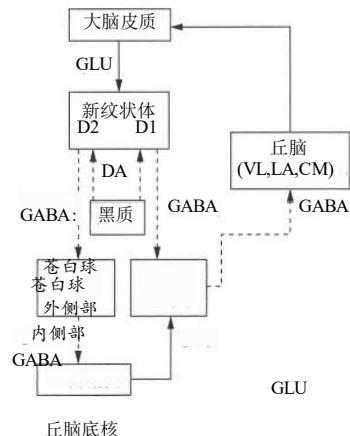
商用 DBS 装置经过数十年研发，于 20 世纪末正式进入临床应用，已在原发性震颤、帕金森病和肌张力障碍等运动障碍病的治疗中取得了令人鼓舞的效果。DBS 这一神经调控技术（或称为脑功能重建性手术）不仅激发了神经科学工作者对其机制研究的极大兴趣，也鼓舞着临床工作者对其他脑功能紊乱导致的疾病持续进行应用探索，例如癫痫（Epilepsy）、强迫症（Obsessive-Compulsive Disorder, OCD）、抑郁症（Depression），顽固性疼痛和药物成瘾等。神经调控理念的拓展还促进了大脑之外神经系统功能调控的探索，如以脊髓电刺激为代表的神经病理性疼痛治疗，以脑神经电刺激为代表的迷走神经电刺激控制癫痫发作，以脊神经电刺激为代表的周围神经病理性疼痛治疗等，其中不少已经逐渐成熟并成功的应用于临床实践。神经调控正在成为除药物和手术之外治疗神经系统疾病的重要手段。探索 DBS 机制的研究多数都围绕运动障碍病手术的常用靶点：丘脑底核、苍白球和丘脑腹侧中间核。

图 58: 脑深部电刺激（DBS）装置系统组成



数据来源：神经科学，东北证券

图 59: 基底节的直接与间接解剖通路



数据来源：神经科学，东北证券

丘脑底核（STN）位于丘脑底部，处于间脑和中脑的交界，在红核的头端外侧，是基底节的重要组成部分。从额叶大脑皮质（主要是运动相关区域）接受兴奋性谷氨

酸能 (GLU) 输入, 从苍白球外侧部 (GPe) 接受抑制性 GABA 能输入。丘脑的束旁核、脚桥核 (PPN) 和黑质致密部 (SNc) 也投射到 STN。STN 发送兴奋性谷氨酸输出到 GPi 和黑质网状部 (SNr) 以及 GPe。STN 是人脑基底节间接通路的重要一环。

苍白球内侧部 (GPi) 得名于尼氏 (Nissl Stain) 染色后表现出的苍白色外观。GPi 被内侧髓板分为内侧部 (Gpi) 与外侧部 (GPe) 两部分。GPi 接受来自 STN 的兴奋性谷氨酸能输入、来自纹状体和 GPe 的抑制性 GABA 能输入, 以及来自 SNc 的多巴胺能输入。Gpi 抑制性 GABA 能神经元投射至腹侧丘脑、丘脑板内核以及脚桥核。Gpi 在啮齿类动物中的同源物是包埋于内囊的脚内核 (Entopeduncular Nucleus)。和 GPe 相比, Gpi 具有相似的神经元胞体和树突形态, 但不像 GPe 神经元那样具有广泛的局部轴突侧枝。

丘脑腹中间核 (Vim) 位于丘脑腹后核 (Vc) 前方, 内囊与 Vim 外侧和腹侧相邻。Vim 这一术语常见于 DBS 相关文献, 而丘脑腹外侧核 (VL) 这一说法常用于生理学研究中。二者的区别在于, Vim 是丘脑内接收小脑信号的区域, 而 VL 指丘脑接受 GPi 和小脑信号输入的区域, 因此包含 Vim。Vim 从大脑皮质和小脑深部核团接受兴奋性谷氨酸能输入, 并从丘脑的网状核接受抑制性 GABA 能输入。Vim 有谷氨酸能纤维投射到大脑运动皮质和纹状体。

DBS 通过单极 (阴极) 或双极模式输出双相方波电脉冲。单极模式下, 电刺激扩散比双极模式更为广泛。神经电刺激不仅能影响电极附近的神经组织, 还可能通过刺激周围经过的轴突从而影响远处的神经元。例如, STN 周围有未定带 (Zona Incerta), GPi 周围有苍白球丘脑纤维束 (包括豆核束及豆状核祥)。所以 STN- 或 GPi-DBS 的效果可能不只是刺激 STN 或 GPi 的表现, 还包括刺激周围相关组织的作用。

神经细胞的不同组成部分对神经电刺激的反应性也不同。神经轴突特别是较大而且髓鞘化良好的轴突比神经胞体更容易被电刺激兴奋。距离神经刺激位点越远越不容易兴奋。此外, 神经电刺激强度越大, 刺激累及的区域可能越广。在神经电刺激区域内能够引发动作电位的最小电流强度 (理论上刺激持续时长可以无限) 称为基强度 (Rheobase), 而以两倍基强度刺激神经到生成。

3.6.2. 脑深部电刺激的作用机制

高频电刺激 (High Frequency Stimulation, HFS) 改变神经元细胞膜特性被认为是 DBS 的机制之一。在体外实验中, HFS 可以阻滞细胞膜上的电压门控钠离子和钙离子通道, 从而降低神经元的兴奋性。通过短暂抑制电压门控钙离子通道, HFS 可以阻止神经元去极化。Beurrier 对大鼠 STN 切片的膜片钳实验显示, 持续 1 分钟的 STN 双极 HFS (100-250Hz) 可以抑制 STN 神经元放电, 这种抑制效果可在刺激结束后持续约 6 分钟。此外, 应用谷氨酸 GABA 受体阻滞剂或钙通道阻滞剂均不能影响 HFS 对神经元的抑制效果。Beurrier 由此推论 HFS 对神经元的抑制并非通过突触介导, 而是直接影响细胞膜上的电压门控通道。

DBS 同样可能影响多巴胺能系统, 影响神经传递。黑质-纹状体神经轴突紧邻背侧 STN, 而刺激 STN 可以激活这些多巴胺能纤维, 使得 STN 中的多巴胺释放增加。

在大鼠中应用微透析技术证实 STN-HFS 可以增加多巴胺及其代谢产物的水平。Lee 等人在麻醉大鼠中同样发现, STN-HFS 可以增加纹状体内多巴胺含量。学者们推断 STN 电刺激可以兴奋黑质-纹状体多巴胺能纤维, 从而使纹状体内多巴胺释放增加, 这可能是 STN-DBS 治疗运动障碍病的机制之一。

DBS 的效果因刺激强度、脉宽和频率而异。从刺激强度而言, 增加电流强度会扩大有效刺激范围, 增加激活的轴突/神经元数量。然而最终产生的效果不能一概而论, 因为刺激范围扩大后可能会累及其他核团或路过纤维, 从而可能产生其他甚至相反的效果。在麻醉大鼠实验中, STN-HFS 在低强度时降低 SNr 兴奋性, 但高强度时增加其兴奋性。因为低强度时的抑制作用可被 GABA 受体拮抗剂阻止, 推测其机制为 GABA 的释放。在丘脑脑片实验中, 较高的电流强度可增加 ATP 的释放, 但刺激频率要在 125~200Hz 的范围内。

DBS 可以引起脑内广泛区域的血流和代谢改变, 影响神经元活动模式。计算机模型研究表明 STN-HFS 可以使 GPi 放电规整化, 从而恢复丘脑-皮质通路的反应性。在对一例肌张力障碍患者的研究中发现, Voa (丘脑腹嘴前核) 中有低频率/高幅度放电以及高频率/低幅度放电两类神经细胞。而 GPi-DBS 可以减少第二类神经元中的放电频率并增加放电幅度。由于 DBS 只影响了一类 Voa 细胞的放电活动, 所以难以将其作用归因于刺激激活的苍白球 GABA 能输出。

综上所述, DBS 的机制并不单一, 其作用可能因所刺激的位置、组织、参数而异。DBS 并非简单的兴奋或抑制某个核团, 其最终的净效果是兴奋、抑制、单突触及多突触作用的综合。DBS 通过调节神经系统疾患中的异常神经活动模式来发挥作用, 例如抑制运动障碍病的异常同步化放电 (震荡)。

3.6.3. 脑深部电刺激与运动障碍病

帕金森病 (PD), 旧称震颤麻痹, 是一种常见的神经系统退行性病变。1817 年, 英国医生 James Parkinson 首先对此病进行了详细描述, 后来为纪念其贡献将此病以其姓氏命名。流行病学调查显示, PD 的发病率随着年龄增长而上升。

PD 的外科手术包括脑深部核团毁损术及脑深部电刺激术 (DBS)。前者通过射频、聚焦超声等方式精准毁损脑内某些核团, 从而达到减轻 PD 运动症状的效果。后者通过在脑内植入刺激电极, 持续高频刺激脑深部核团, 从而控制 PD 的运动症状。DBS 相对于毁损术, 具有可逆性、可调节性、可双侧手术等优势, 已成为 PD 外科治疗的最主要方式。北京功能神经外科研究所李勇杰教授团队回顾性分析了该单位 1998—2019 年共 5126 位接受立体定向手术治疗的运动障碍病患者, 结果显示在 PD 的手术治疗中, DBS 占比已由 2000 年的 1.6% 上升到 2019 年的 97.2%, 而自 2008 年起 DBS 数量已持续超过毁损术。

DBS 治疗 PD 的靶点主要包括 STN 与 GPi。关于二者的适应证和疗效比较, 国内外已有大量文献报道, 其中包括一些随机双盲对照研究。2010 年 Follett 等学者在《新英格兰医学杂志》上发表多中心随机对照研究, 比较双侧 STN- 和 GPi-DBS 患者在 24 个月的随访结果。结果显示两组在主要的随访指标及严重不良事件发生率方面均无明显差异, 接受 STN-DBS 的患者服用多巴胺能药物的剂量比 GPi-DBS 患者低,

视觉运动在 STN-DBS 术后患者中衰退更明显，抑郁水平在 STN-DBS 术后加重而在 GPi-DBS 术后减轻。研究得出结论，STN-与 GPi-DBS 对运动症状缓解程度接近，但选择靶点时应该参考非运动症状方面的影响。

3.6.4. 脑深部电刺激与原发性震颤

原发性震颤（Essential Tremor, ET），又称特发性震颤，是一种最常见的运动障碍病。据统计，ET 在我国北京市 55 岁以上人群中的患病率约为 3.3%。ET 患病率随着年龄而增加，尚无证据显示其发病率有明显种族或性别差异。研究证实，有些 ET 患者可能存在多项认知功能障碍（尤以执行功能、注意力及记忆受损较为明显），这提示额叶可能参与 ET 的病理生理过程。逾半数的 ET 患者伴有抑郁，说明抑郁的神经机制也可能与 ET 发生相关。ET 患者还可以有嗅觉与听力障碍。总体而言，ET 对于患者生活质量的影响弱于 PD，故曾被称为“良性震颤”。部分 ET 患者症状明显并可造成其日常工作、生活、社交和情绪的严重干扰，需要接受药物甚至手术干预。

Vim 是 DBS 治疗 ET 最常选用的靶点，ET 是美国食品药品监督管理局（FDA）最早批准的 DBS 适应证。与丘脑 Vim 核毁损术相比，Vim-DBS 在震颤控制方面效果相当，但其优势在于可以双侧手术，因此尤其适用于需要改善双侧肢体震颤或轴线部位（头、颈、声音）症状的患者。北京功能神经外科研究所的一项回顾性分析显示：双侧 DBS 对于 ET 患者双上肢的震颤改善满意（改善率在 75%~90%），对于头部及声音震颤也有显著缓解。另外，DBS 具有可逆性，神经功能受损的并发症较少。但与之相应的，DBS 可能伴有植入性手术相关的并发症，例如感染、延长线断裂、电极移位等等。此外，DBS 的脉冲发生器可能需要定期更换，其总体费用高于毁损术。

3.6.5. 脑深部电刺激与肌张力障碍

肌张力障碍（Dystonia, Dyst）是主动肌与拮抗肌收缩不协调或过度收缩引起的以肌张力异常的动作和姿势为特征的运动障碍综合征，具有不自主性和持续性的特点。国外流行病学调查显示，原发性 Dyst 的患病率约为 37/10 万。继发性肌张力障碍包含的具体病因不同。

Dyst 分类较多，表现多样，预后不尽相同。DBS 较多应用于保守治疗效果不佳、症状严重的原发性 Dyst，在某些继发性 Dyst 病例中也有应用。DBS 对 Dyst 的效果难以笼统论之，一般认为，早期起病且致残性相对较低的病例（特别是具有 DYT1 突变的病例）可能对 DBS 反应更好。

3.6.6. 脑深部电刺激与其他功能性脑病

癫痫是常见的神经系统慢性疾病，特征是具有两次或以上的无诱因的癫痫发作。癫痫发作是由于大脑神经元同步化过度兴奋造成。癫痫的患病率大约为 7%。据估计，我国有近 1000 万癫痫患者，其中约 600 万病人每年仍有发作，而且每年还会出现 40 万新发病例。

DBS 治疗癫痫发作近年来取得了许多进展。2018 年美国 FDA 批准 DBS 临床应用

于控制药物难治性局灶性癫痫发作。DBS 治疗癫痫的靶点通常选择为丘脑前核 (Anterior Nucleus of Thalamus, ANT)。尽管最初 ANT-DBS 被认为适合颞叶癫痫，研究显示其对于其他类型的局灶性癫痫可能也有作用。

迄今为止美国 FDA 尚未批准 DBS 治疗慢性疼痛，其相关应用仍属研究和探索性质。一般认为，DBS 可以通过外侧和内侧痛觉系统来抑制疼痛。外侧痛觉系统由脊髓丘脑束将痛觉信号从脊髓背角广动力神经元传递至丘脑外侧核群，再投递至大脑躯体感觉皮质；内侧痛觉系统从脊髓背角浅层痛觉特异性神经元发出，经由丘脑中线核群及板内核群特设到前扣带回和岛叶，相较于外侧痛觉系统要缓慢，被认为参与疼痛的情绪成分。

除神经科疾病外，DBS 也可用于常规治疗效果不佳的某些精神科疾病。但相对神经科疾病，精神类疾病接受 DBS 治疗的数量少得多，其研究进展也较缓慢。这可能和精神类疾病类别、表现和机制的复杂不单一性有关。美国 FDA 已批准 DBS 治疗强迫症 (Obsessive-Compulsive Disorder, OCD)，OCD 是 DBS 治疗最多的精神疾病。此外 DBS 还被尝试治疗情绪障碍、妥瑞综合征、药物成瘾、厌食症、孤独症、精神分类和焦虑障碍。DBS 治疗 OCD 时还可改善感觉运动门控，而后者被认为和孤独症、精神分类症有关。展望未来，DBS 因其可逆性和可调节性之优势在精神类疾病的治疗方面有很大的发展。

3.7. 脑机接口相关产品分类及应用场景

脑机接口产业现状国内外差异较大，脑机接口技术的国内外主要研究机构及其代表性成果各有不同。对比中美脑机接口技术现状，在侵入式脑机接口方面中国没有比肩美国的成果。虽然中国在脑起搏器和皮层脑电方面并非空白，但与美国仍有一定差距。在微创脑机接口方面，国内在微创电极方面有部分机构在进行，但缺乏 Neuropixel 等重量级成果，美国研究机构的一些成果是国际合作的产物，目前来看难以超越甚至难以复制。在非侵入式脑机接口方面，国内外差距相对于侵入式较小，国内已经有成熟的研究成果和产品落地。

脑机接口产业链主要包括上游的原材料和器件供应商、中游的设备制造商、下游的应用服务提供商。在产业链上游，原材料供应商为脑机接口领域提供关键的生物医学材料、电子材料等原材料。器件制造商主要负责生产脑机接口所需的各种硬件设备，包括植入式和非植入式脑机接口的传感器、电极、信号放大器和信号处理器等。而中游的系统集成商负责将各种硬件设备和软件系统整合为一个完整的脑机接口解决方案。这包括硬件设备之间的连接与集成、信号采集与处理、数据的传输与存储等。下游的应用服务提供商面向用户，针对不同领域，将脑机接口技术应用于各种实际场景，并提供技术支持、培训、售后服务等。

脑机接口产业链涉及多个技术领域，各环节之间需紧密合作，共同推动脑机接口技术的发展和应用。随着脑机接口技术的不断进步和市场需求的增长，产业链将更加完善和成熟。据统计，全球脑机接口产业链企业中有 400 余家与医疗健康相关。下表基于《脑机接口技术在医疗健康领域应用白皮书 (2021 年)》列出了国内外医疗健康领域的代表性脑机接口产品及应用场景。

表 5：脑机接口产品分类

性质	产品分类	主要场景	产品类型	示意图
侵入性	行为增强	高位截瘫志愿者依靠运动皮质神经信号解析实现控制机械手喝咖啡	外机械臂应用	
	感知增强	利用癫痫患者植入的颅内脑电获取颞中回后部脑区的电信号，进行“意念”汉化打字，具有较高的准确性和较快的打字速度	植入的颅内脑电 获取颞中回后部 脑区的电信号	
	行为增强	使用者通过基于 P300 或运动想象的脑机接口选择目的地后，自动导航系统将根据所选目的地、障碍物信息和轮椅当前位置进行路径规划。在轮椅行驶的过程中，使用者也可以根据需要向轮椅发送停止指令。	轮椅的脑机系统 控制	
非侵入性		视频游戏、科学研究等领域，如意念控制全息图、意念控制无人机、基于脑立方的睡眠分析及助眠应用	意念控制	
		带有多个传感器的冥想装置，可实时监测用户的大脑活动、心率、呼吸、身体姿势，从而引导冥想过程，优化冥想体验。监测实时分析用户专注度，并基于此实现夜间睡眠跟踪	脑电波监测实时分析	
	认知增强	通过收集并分析脑电数据对脑部特定区域施加刺激，调节睡眠，解决睡眠问题	输出 6 位 EEG 脑波，并可同时收集脉搏血氧信号，骨传导信号	
		训练专注力、缓解压力、疲劳检测、心流检测。使使用者通过意念来进行游戏控制，在游戏的过程中达到提高自控力的作用。	检测使用者当前脑波状态，从而获取脑波数据	
		分析出大脑的不同状态，并在佩戴者出于兴奋或专注的状态下，以第一人称视角拍摄 10 秒短视频，从而保证所记录下来的都是佩戴者最感兴趣和最精彩的瞬间	脑电波传感器	

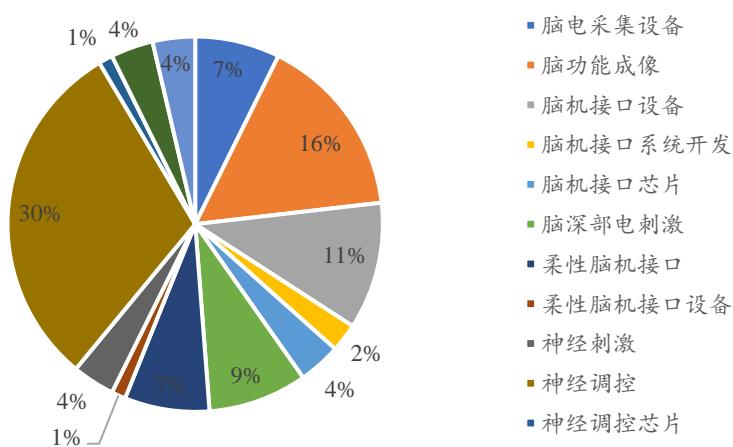
数据来源：东北证券

3.8. 脑机接口一二级市场投融资情况

3.8.1 国内脑机接口投融资情况

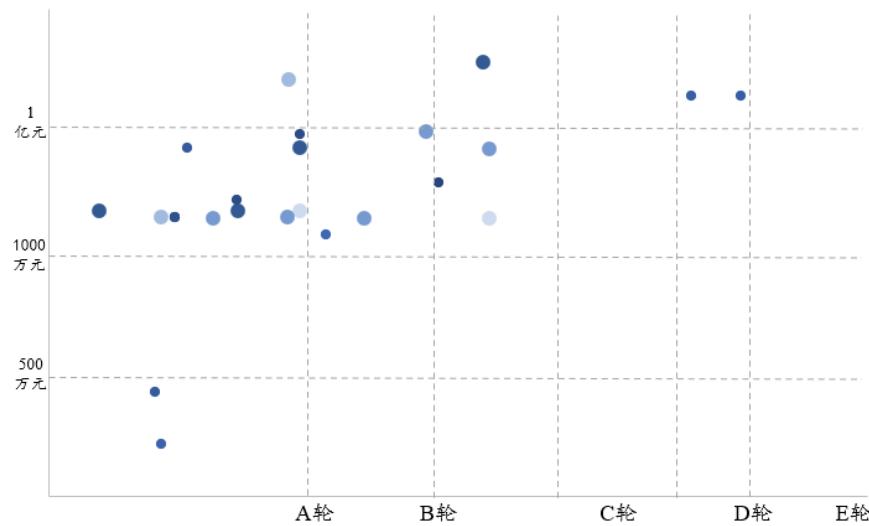
脑机接口一级市场融资普遍处于早期阶段。从发展方向看，神经调控、脑功能成像、脑机接口设备、脑深部电刺激、脑电采集设备、柔性脑机接口获融资笔数较多。从融资规模及轮次看，脑机接口相关融资普遍不足1亿元，轮次普遍为A轮、B轮。脑机接口一级市场融资尚处于早期阶段。

图 60：脑机接口融资笔数结构



数据来源：动脉橙，东北证券

图 61：脑机接口融资轮次分布



数据来源：动脉橙，东北证券

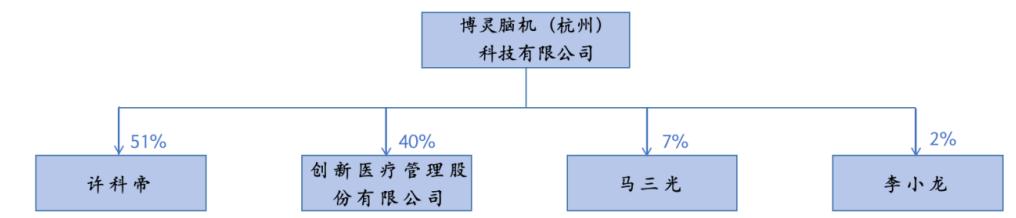
3.8.2 创新医疗子公司：杭州博灵

博灵脑机（杭州）科技有限公司于 2021 年初创立，由上市公司创新医疗和科研团队共同出资设立。公司注册资本为 5000 万元，实纳资金为 2000 万元，致力于脑机接口相关技术的研发、成果转化及对外商业合作。公司重点以脑机接口和泛脑应用

医疗仪器核心技术开发为主，聚焦国际临床存在的高发病率、高致残率脑卒中的治疗和康复的社会问题，研发提高患者康复疗效，使患者获得最大限度的功能改善和最大限度的自理能力的脑机接口新技术。

博灵脑机（杭州）科技有限公司目前的实际控制人为自然人许科帝，目前持有该公司 51% 的股份；第二股东为创新医疗管理股份有限公司，目前持有公司 40% 的股份，其余还有两位自然人股东，分别持有 7% 和 2% 的股份。

图 62：博灵脑机（杭州）科技有限公司股权结构



数据来源：天眼查，东北证券

公司使用 PET 映射在大鼠模型中进行基于 BCI 的刺激。脑机接口（BCI）技术在改善神经系统患者的生活质量方面具有巨大潜力。公司将电极植入丘脑腹后内侧（VPM）核，在刺激右侧 VPM 之前和之后进行 PET 成像研究，发现刺激诱导了显着的定向性能。18F-FDG 摄取在脑室旁丘脑核、海马隔核、嗅球、小脑无名小叶左峰 II，双侧侧隔膜、杏仁核、梨状皮层、内虹膜状核和岛状皮层中显著增加，但在右侧次级视觉皮层、小脑右单小叶和双侧躯体感觉皮层中均有减少。这项研究表明，VPM 刺激后的 PET 映射可以识别与定向表现相关的特定大脑区域。PET 分子成像可能是基于脑机接口的研究及其临床应用的重要方法。

公司证明 VPM 可作为大鼠机器人导航控制的首选用途。老鼠机器人的概念最初于 2002 年提出，为该领域带来了一个新的研究方向。利用现代神经科学和机器人学对最适合用于老鼠机器人导航系统的方法进行了研究。目前的研究集中体现在基于奖励的空间导航的使用上，结合了诱导奖励感觉和“虚拟触摸”感觉的概念来控制老鼠机器人的运动。然而，这些方法受到影响成功率的局限性以及制备程序的困扰，即使在相似的条件下，也可能对不同的大鼠产生不同的影响。

因此，公司研究了刺激大脑的两个不同部分以诱导大鼠内部的转动运动，即腹侧后内侧（VPM）丘脑核和桶场（BF）皮层，并证明了 VPM 作为大鼠机器人导航控制的首选用途。通过在 VPM 核中应用深部脑电刺激，开发了一种新的转向行为控制方法。与以前的 BF 刺激方法相比，这种新方法消除了训练程序，大大节省了时间和人力。因为大鼠机器人在手术恢复后就可以立即使用，并且可以保持其性能数月，而无需重新加强其训练。VPM 刺激方法还显示出通过调整不同电刺激参数的组合来定量控制转弯角度的潜力。因此，VPM 电刺激方法为更精确地控制老鼠机器人的导航控制提供了一种优越的方法。

公司进行了计算机、大鼠和大鼠半机械人解决迷宫的比较研究。半机械人智能是一种新兴的智能范式。它旨在通过神经接口将机器和生物连接起来，将机器智能与生物智能深度融合，通过将生物认知能力与机器计算能力相结合来增强实力。半机械

人智能被认为是一种用机器智能增强生物的新方法。公司通过构建老鼠机器人，以演示它们如何通过集成机器智能来加快迷宫逃出生任务，并比较了计算机、个体大鼠和计算机辅助大鼠（即大鼠半机械人）解决迷宫的性能。它们被要求在十四个不同的迷宫中找到从进口到出口的路。迷宫解决的性能通过步数、覆盖率和花费的时间来衡量。

对 6 只大鼠及其智力增强大鼠半机械人的实验结果表明，大鼠半机械人在逃离迷宫方面表现最好。这些结果为机器人智能提供了原理验证。计算机辅助老鼠进行死路检测、独特道路检测、环路检测和最短路径检测，增强了老鼠解决迷宫的能力。在步数、覆盖率和花费时间方面，大鼠机器人在解决迷宫方面的表现优于个体大鼠；在覆盖率方面，老鼠机器人在迷宫解谜方面比单台计算机具有更好的性能。公司还将研究更实用的老鼠机器人：网络摄像头将被安装在老鼠身上的传感器所取代，如微型摄像头、超声波传感器、红外传感器、电子罗盘等，实时感知真实的未知环境；计算机辅助算法可以安装在无线背包刺激器上，而不是在计算机中。新颖的机器人智能系统 (Rat Cyborg) 在各种应用中具有巨大的潜力，例如在复杂地形中的搜索和救援。

研究团队简介：

刘宇腾：中国人民大学经济学硕士。曾任职于华创证券研究所。2021年加入东北证券。

高皓天：清华大学金融硕士，清华大学经济与金融本科。2022年加入东北证券，现任东北证券医药组研究助理。

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，并在中国证券业协会注册登记为证券分析师。本报告遵循合规、客观、专业、审慎的制作原则，所采用数据、资料的来源合法合规，文字阐述反映了作者的真实观点，报告结论未受任何第三方的授意或影响，特此声明。

投资评级说明

股票 投资 评级 说明	买入	未来6个月内，股价涨幅超越市场基准15%以上。	投资评级中所涉及的市场基准： A股市场以沪深300指数为市场基准， 新三板市场以三板成指（针对协议转让 标的）或三板做市指数（针对做市转让 标的）为市场基准；香港市场以摩根士 丹利中国指数为市场基准；美国市场以 纳斯达克综合指数或标普500指数为市 场基准。
	增持	未来6个月内，股价涨幅超越市场基准5%至15%之间。	
	中性	未来6个月内，股价涨幅介于市场基准-5%至5%之间。	
	减持	未来6个月内，股价涨幅落后市场基准5%至15%之间。	
	卖出	未来6个月内，股价涨幅落后市场基准15%以上。	
行业 投资 评级 说明	优于大势	未来6个月内，行业指数的收益超越市场基准。	
	同步大势	未来6个月内，行业指数的收益与市场基准持平。	
	落后大势	未来6个月内，行业指数的收益落后于市场基准。	

重要声明

本报告由东北证券股份有限公司（以下称“本公司”）制作并仅向本公司客户发布，本公司不会因任何机构或个人接收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本公司具有中国证监会核准的证券投资咨询业务资格。

本报告中的信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。报告中的内容和意见仅反映本公司于发布本报告当日的判断，不保证所包含的内容和意见不发生变化。

本报告仅供参考，并不构成对所述证券买卖的出价或征价。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的证券买卖建议。本公司及其雇员不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，在任何情况下，我公司及其雇员对任何人使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失概不负责。

本公司或其关联机构可能会持有本报告中涉及到的公司所发行的证券头寸并进行交易，并在法律许可的情况下不进行披露；可能为这些公司提供或争取提供投资银行业务、财务顾问等相关服务。

本报告版权归本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表或引用。如征得本公司同意进行引用、刊发的，须在本公司允许的范围内使用，并注明本报告的发布人和发布日期，提示使用本报告的风险。

若本公司客户（以下称“该客户”）向第三方发送本报告，则由该客户独自为此发送行为负责。提醒通过此途径获得本报告的投资者注意，本公司不对通过此种途径获得本报告所引起的任何损失承担任何责任。

东北证券股份有限公司

网址：<http://www.nesc.cn> 电话：95360,400-600-0686 研究所公众号：dbzqyanjiusuo

地址	邮编
中国吉林省长春市生态大街 6666 号	130119
中国北京市西城区锦什坊街 28 号恒奥中心 D 座	100033
中国上海市浦东新区杨高南路 799 号	200127
中国深圳市福田区福中三路 1006 号诺德中心 34D	518038
中国广东省广州市天河区冼村街道黄埔大道西 122 号之二星辉中心 15 楼	510630

