

医院手术室运作管理: 研究热点及发展方向

王 昱¹, 唐加福², 曲 刚³

(1. 沈阳农业大学 经济管理学院, 沈阳 110866; 2. 东北财经大学 管理科学与工程学院, 大连 116025;
3. 大连市皮肤病医院, 大连 116025)

摘 要 手术室是医院的瓶颈资源, 其运作管理涉及到多部门、多资源的协调优化. 由于其在医院管理中具有重要的地位, 手术室运作管理已成为学界的研究热点. 本文从管理科学角度阐述了手术调度问题; 针对手术室管理模式与运作流程, 探讨了目前手术室管理过程中面临的问题与挑战. 根据医院的现实场景构建了手术室运作管理的研究框架, 进而在这一框架下对现有研究进行系统综述, 从问题分类、影响因素、研究方法入手总结了目前研究的热点、难点, 并结合目前研究成果指出了研究的空白点及发展方向.

关键词 医疗运作管理; 手术室调度; 综述; 运作管理

Overview and prospects of operating rooms management

WANG Yu¹, TANG Jiafu², QU Gang³

(1. College of Economics and Management, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. College of Management Science and Engineering, Dongbei University of Finance and Economics (DUFE), Dalian 116025, China;
3. Dalian Dermatology Hospital, Dalian 116025, China)

Abstract Operating rooms (OR) management is a research hotspot, since ORs are a kind of bottleneck resources in hospitals and ORs management are related to up-and downstream departments and resources. On the perspective of management science, the paper overviews the issue of operating rooms management, and builds the research scheme based on real-life scenarios. The questions and challenges faced in the operations research have been discussed. From the aspects of problem categories, influence factors and research methodologies, we review the related work and conclude the hot topics, difficulties and new trends.

Keywords healthcare operations; operating rooms management; review; operations management

1 引言

医疗服务业是关系国计民生、人民生命安全的重要行业. 近年来, 全球人口的快速增长及老龄化的加剧导致了医疗工作量的增加^[1]. 医疗资源相对紧缺, 给医疗服务业带来了巨大的挑战. 手术部作为医院的核心部门, 是为患者提供手术及抢救的场所^[2], 是整个医疗环节中使用设备最昂贵、动用人力资源最广泛、涉及资金最多的医疗过程. 据不完全统计, 手术全过程会涉及整个医院 70% 的部门^[3]. 因此, 手术室在整个医院管理中具有枢纽作用, 其利用率的高低直接关系到外科患者的周转. 由于患者需求和手术过程存在着大量的不确定性, 包括: 服务时间的不确定性、急诊患者到达的不确定性以及由上述不确定性引发的手术停台风险,

收稿日期: 2017-06-29

作者简介: 王昱 (1987-), 女, 汉, 辽宁铁岭人, 讲师, 博士, 研究方向: 医疗运作管理, 优化与调度, E-mail: wangyu@syau.edu.cn; 唐加福 (1965-), 男, 汉, 湖南东安人, 教授, 博士生导师, 服务运作管理, E-mail: jftang@mail.neu.edu.cn; 曲刚 (1971-), 男, 汉, 辽宁大连人, 副主任医师, 博士, 医疗运作管理.

基金项目: 国家自然科学基金 (71601128, 71601088); 中国博士后科学基金 (2016M600215)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71601128, 71601088); China Postdoctoral Science Foundation (2016M600215)

中文引用格式: 王昱, 唐加福, 曲刚. 医院手术室运作管理: 研究热点及发展方向 [J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(7): 1778-1791.

英文引用格式: Wang Y, Tang J F, Qu G. Overview and prospects of operating rooms management[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(7): 1778-1791.

增加了手术室管理的难度. 长期以来, 存在着患者入院迟迟安排不上手术, 手术停台率高, 急诊患者救治不及时, 医生疲劳操作等不合理现象^[4]. 如何缓解手术资源的供需矛盾, 合理高效地利用有限的手术资源, 为患者提供及时、舒适的手术治疗, 已经成为备受医患关注的社会问题^[5].

从管理科学的角度来看, 所谓手术室优化与调度问题, 是根据患者需求及院方的手术能力, 产生一段时间内、满足一定约束条件的手术时间表的过程^[6]. 广义的手术室优化与调度除手术时间、地点的调度外, 还包含科室间的能力分配、医护人员的协作排班以及手术器材等相关资源的分配与调度. 手术室优化调度本质上是不确定环境下的多因素、多指标的资源分配问题, 通过决策调度方案以实现医院和患者双方的利益. 这些因素包括环境因素(患者类型、病情严重程度、手术流程、急诊患者动态到达、手术时长不确定性等)和行为因素(患者病情临时变化导致的手术取消行为、患者对医生和手术时间的选择行为等); 常用的指标包括经济性指标、患者等待时间指标、资源利用率指标、医患满意度指标、完工时间指标等. 正是因为这些因素, 使医院手术室优化调度问题显得重要, 也非常复杂, 已经成为学者研究的热点问题^[7-11].

2 医院手术室管理的现状分析

2.1 医院手术室的运作模式与流程

随着医学科学的发展, 医疗技术水平的提高, 以及人民群众对医疗需求的变化, 各个医学学科手术技术愈加先进. 与之对应的, 手术的运作流程, 手术所需的辅助资源也愈加复杂. 手术部作为医院的重要部门, 有其特定的运作模式. 在手术室优化与调度过程中, 仅将注意力集中在手术本身是不科学的, 而需要将手术与手术资源调度整合在一起. 住院病房、重症监护病房、麻醉师等资源与手术能否顺利开展息息相关, 了解手术运作流程, 是研究手术室优化与调度问题的前提条件. 国内与欧美等国家医疗运作管理模式存在差异, 手术运作流程不尽相同; 各个医院由于其管理模式和实际情况不同, 手术运作模式也有所不同. 这里仅介绍两种常见的手术运作模式.

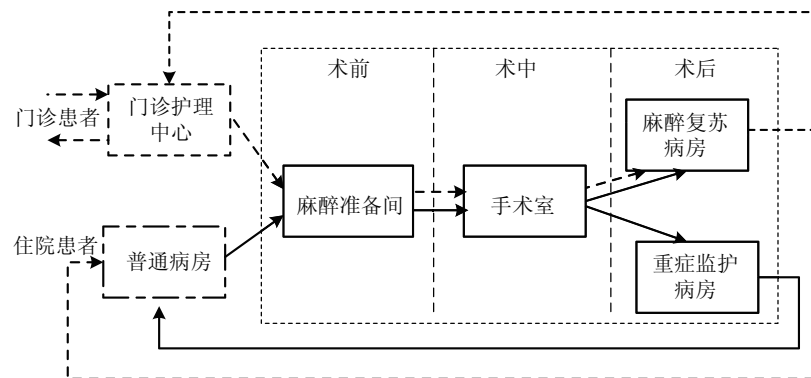


图 1 手术流程图

综合型医院一般由门诊部和住院部分别收治患者手术, 门诊部是门诊病人诊疗的处所, 医生在门诊部对非住院患者进行诊疗, 或经过门诊收纳住院治疗; 住院部是住院病人接受治疗的处所, 医院应根据病人的性别、年龄、疾病种类、病情轻重、病人要求以及医师意见, 确定病人入院时间、病房、病床及治疗方案. 对于多数大中型医院, 手术运作流程如图 1 所示^[12], 虚线部分表示门诊患者的流动方向, 实线部分表示住院部患者的流动方向. 当患者准备手术时, 首先, 将门诊患者和住院患者分别由门诊护理中心、普通病房转移至麻醉准备间等待手术, 经术前护士核对患者病历, 协助病人做好术前准备工作后(如更换手术服, 放松心情等), 麻醉师根据手术需要, 将病人局部麻醉或者全身麻醉后送往手术室. 进入手术室后, 由一名或多名主治及助理医生在护士的协助下为病人手术. 每一例手术完成后, 手术室都需进行全面的清扫消毒. 患者在手术完成后被转移至术后康复病房, 在专门护士的护理下, 病情稳定后, 门诊患者回到流动护理中心准备出院, 住院患者回到普通病房住院观察, 对于病情特别严重的患者, 术后需转移到重症监护病房进行严密监护. 目前国内仍有许多医院因为医疗经费、设施有限, 未启用麻醉准备间或麻醉复苏室, 其手术的静脉开放、麻醉操作和麻醉苏醒需要在手术间进行, 造成了一定的资源浪费, 其手术运作模式相对简单, 手术流程可简化为图 1 的术中和术后部分, 即患者手术经历从普通病房到手术室, 从手术室回到原病房或者重症监护室两次空间转换.

手术室是医院对患者进行手术、检查、治疗和抢救的重要场所,手术室空气环境的洁净程度直接影响患者的创口愈合和健康^[13]。2002年,我国颁布了GB50333《医院洁净手术部建筑技术规范》,各级医院开始逐步推行建立洁净手术室。洁净手术室是采用空气洁净技术对微生物污染采取程度不同的控制,达到控制空间中空气洁净度适于各类手术的要求,并提供适宜的温度、湿度和尘埃含量,创造一个洁净舒适的手术环境。患者根据其手术需求,被安排至不同层级的洁净手术室或者普通手术室。洁净手术室与一般手术室的运作管理存在着差异,它的手术室消毒净化时间更长,设有进入手术室的专用通道,对于连台手术,应在前一手术完成后立即进行室内的清洁擦拭,并在30分钟后进行下一台手术。

2.2 医院手术室管理面临的问题与挑战

近年来,我国医疗卫生体制改革取得重大创新,全民基本医疗保障政策的实施在一定程度上缓解了“看病贵”问题,人民生活水平显著提高。与此同时,人们对于健康的关注与日俱增,随着人口老龄化的加剧,病人数量逐年攀升。尽管医院手术室建设取得了很多成就,但仍面临很多问题与挑战:

1) 手术资源相对短缺。存在着患者入院迟迟安排不上手术,“看病难、看病贵”的现象。我国人口占世界人口的22%,但医疗资源却仅占世界医疗资源的2%^[14]。也就是说,差不多1/4的人口只占用1/50的医疗资源。人口老龄化和人们对健康意识的提高,更是增加了医院的就诊量。以中国医科大学附属第二医院为例,2011-2013年,全院年手术台次从6.9万台增长到8.3万台,年增长率超过了8%。巨大的手术需求给手术室的医务人员带来了高强度的工作负荷,并且产生了大量的人员、中央设备等利用成本。

2) 手术室利用率低。目前,大多数医院的手术排程都是由护士长手工完成,护士长根据手术台数、手术间的大小与手术类型对择期手术做出相对固定的安排,为有效协调各组工作,定出每周的择期手术安排表。但在实际操作过程中,由于手术患者、病情存在差异,以及手术医生技术水平的差异,预期的手术工作量和实际手术时长差异较大,造成了手术资源的浪费。另一方面,手术室的工作需要主刀医生、助理医生、麻醉师和护士的配合完成,每一个环节的疏漏延迟都会影响后续工作的开展,降低手术室的使用效率。因此,严格遵守手术室的管理制度,医护人员提高责任心,严格遵守在岗时间,各负其责,对于减少手术室无效时间,提高手术室使用效率有着重要意义。

3) 医患矛盾显现。近期国内发生了多起恶性伤医时间,多数是由于医生与患者间沟通不当引发的。手术患者多、急诊手术量大,工作繁忙,使得医生把更多的精力放在工作本身,而忽略了与患者沟通病情以及进行心理疏导,导致患者将“看病难、看病贵”等矛盾转嫁到医生本身,部分极端的案例导致了无法挽回的恶果,这也给医护人员提出了新的要求。医生在沟通过程中要做到心中有数、换位思考,避免使用专业术语,力图从患者和家属的角度讲解手术的注意事项及手术过程,降低其陌生感,消除其不良情绪,减低患者术前的紧张、焦虑感。另一方面,为了提高患者就诊的满意度,部分医院试点开展了“患者选择医生,患者可指定就诊时间”的策略,医院关注了患者在就诊过程中的心理体验,一定程度上提高了患者满意度,增加了患者对医院的信任度。

4) 手术停台率高。择期手术当日停台在各级医疗单位均有发生。这不仅打乱了正常有序的工作安排,造成人力、物力的浪费,导致反复进行禁食、禁水和备皮等术前准备,也增加了患者的痛苦和医务人员的工作量,延长了住院时间,甚至导致纠纷发生。疾病和术前准备不充分是择期手术当日停台的重要原因^[15],其主要因素为术前检查缺项和手术器械或设备未到位。手术服务时间的不确定性是导致手术临时停台的另一诱因,预期的手术计划无法在工作时间内完成,导致后续的手术被临时取消。增强医护人员对术前准备和医患沟通的重视程度,建立手术停台的常态监管机制,增加手术计划的鲁棒性可在一定程度上降低手术停台率。

3 手术室运作管理的构成要素与分类

本文的关注点是使用运筹学与系统工程思想优化手术排程,这部分介绍了手术室运作管理建模过程中的需要考虑的环境因素和优化目标。

3.1 手术室运作管理的影响因素

通常情况下,在手术室运作管理的建模过程中,往往需要考虑到患者、手术资源、工作人员三方面要素影响,如图2所示。

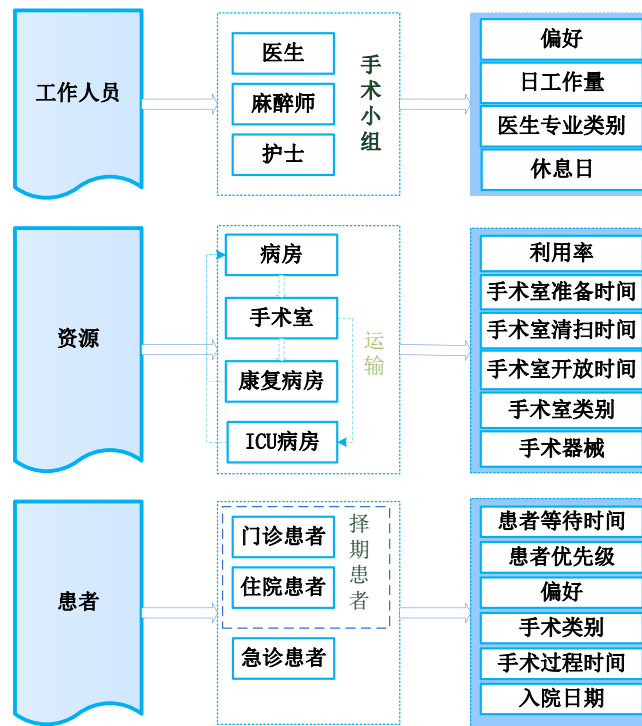


图 2 手术室管理的影响因素

1) 患者. 患者分为择期和急诊两类. 择期患者容许术前充分准备, 达到一定的标准条件, 再选择最有利的时机施行手术. 急诊手术以救治生命器官或者挽救生命为目的, 患者入院后需要尽快接受手术治疗. 由于急诊患者到达的随机性, 增加了研究的难度, 因此, 已有文献中面向择期患者的研究多于急诊患者^[11], 急诊调度具有较好的研究前景. 通常情况下, 急诊患者到达后, 院方需要立刻为急诊患者分配手术资源. 若手术室为空闲状态时, 患者能够立刻接受手术治疗; 若手术室为忙碌状态, 则急诊患者插入至等待队列的最前端, 手术室一旦空闲, 立刻为急诊患者手术. 急诊手术调度方式主要有两种: ①设立急诊手术室专门处理急诊需求^[16]; ②在普通手术室预留一部分急诊能力^[17]. Wullink 等^[18]和 Ferrand 等^[19]指出, 设立专门的急诊手术室不能解决高峰时段拥堵和急诊救治不及时的问题, 反而会降低手术室的使用效率, 增加急诊患者的等待时间和员工的加班时间. 因此, 在考虑急诊患者动态到达的情况下, 合理的预留急诊能力, 是提高手术室运作效率的关键^[20].

急诊患者的到达是随机的, 若预留的急诊资源不足, 则会导致急诊患者等待、推迟或取消择期手术任务的情况发生; 若预留的急诊能力过多, 则会导致手术室资源的浪费. Heydari 和 Soudi^[21]研究了两类患者的联合调度问题, 在择期手术室预留手术能力以应对急诊需求, 开发了基于情景的两阶段随机规划模型. 与之类似的, Adan 等^[22]在普通手术室预留急诊需求, 在假定急诊患者的到达率已知的情况下, 研究了与手术相关的多资源分配问题, 其中多资源包括床位、手术室、重症监护室以及重症监护护理人员. Saghafian 等^[23]将急诊患者按照病情紧急程度进一步细分, 基于历史数据对急诊患者流进行预测, 将急诊达到出院整个过程建模为仿真模型, 决策患者的准入情况并进行排序, 分析了模型性能, 方法在优化患者流的同时, 提高急诊患者响应速度. Lamiri 等^[17]给定了急诊手术需求的分布函数, 以最小化手术室运作成本为目标, 将两类手术的联合调度问题建模为随机规划模型, 设计列生成算法求得了问题的近优解. Gerchak 等^[24]以最大化收益为目标, 针对手术室的预调度问题展开研究, 在考虑急诊需求的情况下, 决策手术室日接收择期患者的数量, 文章假定急诊需求和择期患者手术时长的分布函数已知, 建立问题的随机动态规划模型, 理论推导了目标函数的性质.

2) 手术资源. 手术室是整个医院中资源最为密集的地方, 它占用了整个医院资源耗费的 40%^[1]. 医院的手术资源有限, 在同一时间段, 一套资源只能为一例手术服务, 如何合理的将有限的资源分配给患者, 是建模的关键之一. 在手术室资源调度中, 主要资源包括: ①手术室数量限制: 每家医院的手术间数量是固定的, 每

天可以做的手术也是有限的;目前,我国医院正在推行普及洁净手术室,不同的手术间的洁净等级不一样,与之匹配的手术也不同,有一些手术对手术间的要求较高,必须放在特定的手术间实施。②病床限制:病房或者 ICU、PACU 病床短缺也会造成手术无法进行。③手术器械限制:手术器械是指在临床手术中所使用的医疗器械,除常规手术器械外,还有一些专科用的器械:骨科、泌尿科、妇产科、烧伤科、整形外科、脑外科、心胸外科、普外科等等。例如:取环钳主要用于妇科在取节育环时使用;取皮机主要用于烧伤科,当患者大面积烧伤需要皮肤移植时,取自体皮时必用。患者手术的差异性使得其对手术器械的需求也有所不同,在术前器械护士要准备好所有需要的器械以保证手术的进行。

手术室在整个医院管理中具有枢纽的作用。手术室与各部门、科室的工作流程就像齿轮一样,紧紧的咬合在一起,不管齿轮的大小,只要一个齿轮出现问题,都会影响大齿轮的运转,影响手术室的工作效率。Tory 和 Rosenberg^[25] 指出手术室与康复病房、重症监护病房相互联系,只有在康复病房(或者 ICU 病房)空闲时为患者手术,才能保证患者在术后及时转移并接受康复治疗。Lamiri 等^[17] 在模型中考虑了手术术前准备时间及术后清扫时间,使模型更加贴近实际手术流程。Roland 等^[26] 则指出手术室存在空闲开放时间以及加班时间都是不合理的,造成了资源的浪费和手术成本的提高,文章以最小化医院手术成本费用为目标建模,并开发了遗传算法。

3) 手术人员。通常情况下,手术的全过程由主刀医生、助手、麻醉师、器械护士、巡回护士等人共同参与完成,手术的人力成本很高。并且,手术的人员联动性强,给手术室调度造成了很大的难度。据不完全统计,手术全过程会涉及整个医院 70% 的部门^[3],手术流程给术前的医技部门、护理部门,手术后的监护室、病床的人员带来工作量。医院培养一位优秀的医生需要大量的时间、金钱和经验的累积,医生是医院非常宝贵的人力资源。一些医院,特别是教学类医院,医生除了手术任务之外,还承担着门诊、教学和科研的工作,医生也需要有休息日,所以在手术医生的调度过程中,要充分考虑到医生的可用手术日对排程造成的影响。护士的工作职责繁杂,且不仅仅在手术,在医院的各个部门中都发挥着重要的作用,目前国内外有很多学者在研究护士排班的工作,在这里我们不再赘述。

理想的手术时间应该只包含纯粹的手术室时间,而广义的手术时间还包含静脉开放时间、麻醉时间和麻醉苏醒时间。在实际手术过程中,总会出现不同阶段的无效时间,如护士、患者不能按时入室,静脉开放后麻醉师未到位,麻醉完成后手术医生未到位,手术结束患者苏醒后运送人员未到位等。为了有针对性的解决这些问题,规范手术室人员管理条例、提高医护人员责任心,优化各级人员工作时间表对改善现有问题,提高手术室使用效率,降低人员成本有帮助。

Roland 等^[26] 在手术室人员调度中强调了人力资源的整合与偏好,将医护人员细分为两类:一、无指向性人力资源,指麻醉师及护士,为每一位患者均可服务;二、有指向性的人力资源,指医生,文章建立医护人员调度的混合整数规划模型,开发了基于遗传的启发式算法。Kharraja 等^[27] 将不同技术类别的医护人员,如麻醉师、医生、护士组成一个手术小组,指派为患者手术的手术小组编号,在手术室优化与调度的同时完成了医护人员调度。为了防止医护人员由于过度疲劳造成的手术事故,Wang 等^[28] 中引入了日最大工作时长、休息日等限制,制定了更加人性化的手术排程策略。Roshanaei 等^[29] 考虑了医生班次、手术室类型及能力限制等约束,建立了手术调度问题的混合整数规划模型,决策患者的手术日期及先后顺序,模型的目标包括最小化开放手术室的数量、使用医生的数量以及手术室超时时间。

3.2 手术室运作管理的优化目标

由于医院实际情况各异,目标函数的选择也有所不同。较为常见的目标为经济性指标、患者等待时间、医患满意度、完工时间等^[11,30]。

1) 经济性指标。常见的经济性优化目标有最小化手术室运作成本、最大化院方收益和最小化患者入院治疗费用。手术室的配置和运营非常昂贵,是医院的重要财政支出部门,人、财、物投入多,医疗资源密集,高值医疗设备和器械多。其设备日常运行维护、人员、水电等费用与手术室运作成本直接相关。若手术室调度不当,导致手术室在开放时间空闲、或者安排好的手术任务无法在规定时间内完成,医护人员需要加班完成手术任务,都是医院不希望看到的现象。手术室空闲是对手术资源的浪费,反之,医护人员的加班费用昂贵,

据估算, 手术室单位超时开放时间所导致的人员设备费用支出是正常开放时间的 1.75 倍^[31]。

Gupta^[32] 指出手术室是医院收益和支出的主要部门, 优化手术安排可以有效提升医院收益。文章抽象出医院手术室管理中常见问题进行建模, 研究了面向择期手术的多科室能力分配问题, 建立了以医院收益最大为目标的数学规划模型; 将手术按照紧急程度的不同, 划分为多个等级, 其中急诊手术具有最高优先级, 在考虑下游麻醉复苏室、重症监护病房和普通床位的能力约束下, 建立了最大化收益为目标的手术能力分配模型。Freeman 等^[33] 认为单位手术室在正常工作时间的开放成本和人力资本是固定的, 手术室运作成本只与开放手术室的数量及加班时间有关系, 文章考虑了择期手术时长的不确定性和潜在紧急需求的动态到达, 建立了基于场景的混合整数规划模型, 最大化院方的期望收益。

2) 患者等待时间。据华西都市报 2012 年 2 月 22 日的新闻报道, 调查发现, 消费者看病选医院最关心的是能否方便就诊, 而就医等待时间过长成为大家共同的困扰。在医院手术部门, 患者面临的问题同样严峻, 即便患者等到床位顺利入院, 但入院后迟迟安排不上手术的现象时有发生, 增加了患者的治疗费用和经济负担, 导致了患者的不满。如何降低患者等待队列的长度, 减少患者的平均等待时间已经成为学者研究的一个重要目标。

Torkki 等^[34] 研究创伤外科手术患者的调度问题, 文章对整个手术流程进行分析, 使用工业流程管理的思想, 遵循计划 - 执行 - 调整 - 执行的准则对手术进行安排, 结果发现, 方法将患者的等待时间降低了 20.5%。Denton 等^[35] 根据患者手术时间的方差给出了一种手术排序规则, 这种排序规则可以帮助患者减少手术当日的等待时间, 同时提高手术室的利用率。

3) 医患满意度。如何更加高效的利用医疗资源, 为患者提供较为满意的医疗服务, 已经成为政府和医疗机构面临的问题。医院管理信息系统的发展使得患者网上挂号、预约成为常态。私立与公立医院的结合满足了患者多元化的就医需求, 提高了患者的就医体验。一方面, 医生是手术实施的主体, 是医院花费大量时间、物力、财力培养的宝贵资源, 医生是工作强度大、压力大的职业, 且一些医生除了手术任务, 还承担了科研项目、门诊、教学任务, 如何提高医生的满意度, 避免人才流失, 使得医生在较为愉悦的心情下高效率的完成手术任务, 也是院方关注的一大课题。相比其他目标, 满意度的目标研究较少, 究其主要原因, 是因为医患满意度较难在模型中显性表达。Ferreira 等^[36] 建立了手术室运作管理的仿真优化模型, 数值实验发现提高手术室的运作效率有助于提高患者满意度。Velasquez 和 Melo^[37] 在考虑医护人员, 器械的资源限制下, 研究了多手术室调度问题, 建立了以最大化患者满意度和最小化医院运作成本为目标的数学模型。

4) 完工时间。完工时间这个目标一般用于手术室的日调度问题上, 指手术计划中最后一位患者完成手术治疗的时间。控制手术完工时间有助于提高工作效率, 避免医护人员不必要的加班情况产生。完工时间指标起初源于车间调度领域, 由于问题具有一定的相似性, 后被引入至手术室调度问题上。Pham 和 Klinkert^[12] 将手术任务划分为术前、术中、术后三个阶段, 将一个手术任务视为需要资源的一系列加工过程, 以最小化完工时间为目标决策患者的手术顺序以及手术各个工序的起始时间; 对于突然到达的急诊患者, 预留一定的手术资源, 将急诊看做临时增加的工件进行调度, 确保急诊患者在当日可以完成手术。

在手术室优化与调度问题中, 部分目标之间是存在着相互联系, 可以相互转化的。比如, 患者的等待时间可以转化为与患者等待时间或者住院天数相关的手术费用; 医院的手术室利用效率多被表示成与最小化空闲开放成本与加班成本之和; 患者的手术等待时间过长, 必然造成患者对手术安排不满意, Wang 等^[28] 在手术计划安排中以患者满意度最大为目标, 其中患者满意度随着等待时间的增长而单调下降; 最小化最大完工时间避免了加班时间的产生, 降低了加班成本等等。通过阅读整理大量的手术室优化调度的相关文献, 对考虑各种性能指标的文章进行归纳总结, 如表 1 所示。

4 手术室优化与调度问题的分类

按照调度周期的长短和决策内容的不同, 手术室优化调度问题可以分为三类, 手术室能力分配问题、患者主手术计划问题、患者手术排序问题^[38], 如图 3。

1) 手术室能力分配问题, 涉及到的决策内容包括: 医院需要建设多少间手术室以满足未来几年的手术需求, 每个科室要如何分配手术能力以合理化利用手术资源, 院方需要引进何种手术器械以满足患者需求等。

表 1 考虑不同性能指标和目标函数的文章汇总

性能指标	文章编号
手术室准备时间	[1] [11] [17] [28] [39]~[41]
手术室清扫时间	[1] [11] [17] [28] [39]~[44]
手术室开放时间	[1] [11]~[12] [26]~[28] [30] [32] [37] [39] [42] [44]~[68]
手术室类别	[7] [11] [28] [30] [43] [48] [69] [70]
手术器械	[11] [26] [30] [37] [47] [48] [50] [52] [58] [69]~[71]
病房	[30] [42] [43] [51] [52] [56] [59] [60] [67] [72]~[76]
ICU	[11] [25] [30] [39] [67] [77]
麻醉复苏室	[11] [28] [30] [37] [42] [48] [50] [52] [73] [78]
患者优先级	[30] [38] [71] [75] [79]
患者偏好	[11] [36] [37] [44] [59] [64] [80]
医生偏好	[7] [11] [44] [50] [59] [64] [79] [81] [82]
患者手术时长	[1] [6] [11] [16] [27] [30] [37]~[39] [42]~[47] [49] [54] [58] [59] [61]~[63] [67] [68] [70] [73] [75] [78] [83]~[85]
医生日工作量	[7] [11] [26] [30] [37] [43] [44] [48] [50] [54] [62] [70] [73] [79] [81] [86] [87]
目标	文章编号
患者等待时间	[11] [26] [30] [35] [38] [48] [67] [74] [87]~[93]
经济性	[11] [16] [25] [30] [38] [39] [43] [45]~[49] [54] [59] [68] [70] [75] [84] [85] [94]
手术室利用率	[1] [11] [30] [43] [48] [52] [54] [58] [62] [79] [80] [83]
完工时间	[11] [12] [30] [42] [48] [70]
医患满意度	[7] [11] [30] [36] [82]
手术延时或取消	[6] [11] [15] [86] [89] [95]
其他	[7] [43] [44] [48] [70] [73] [79] [96]

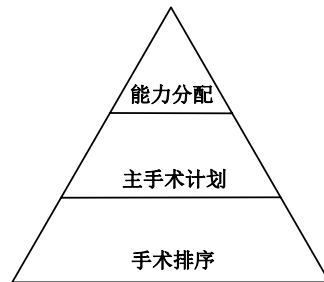


图 3 手术室管理的三层次问题

手术室能力分配问题属于战略层面,在三层次决策中所考虑的时间周期最长,短则几个月到一年,长达几年。

Gupta^[32] 针对手术室扩建场景展开研究,决策如何对医院的手术室资源进行再分配,在保证再分配的手术室资源不小于当前水平的情况下,最大化医院手术部的总收益。文章根据经验,给出各科室单位手术时间的平均收益,对于未分配的手术资源,由所有科室共同使用,增加了能力分配方案的灵活性,降低了由于手术需求发生偏差造成的医院收益损失。

Choi 和 Wilhelm^[45] 面向医院多科室的手术室时间分配问题展开研究,将手术室时间分配问题抽象为报童问题,建立了以最小化手术室无效使用与超时使用成本为目标的非线性随机规划模型,通过情景近似方法,将原模型转化为混合整数规划模型进行求解。

2) 手术室主手术计划问题。问题以满足患者手术需求为基础,在考虑手术相关资源的限制下,决策内容主要包括决策每位患者的手术时间及地点,侧重于手术计划与手术能力的平衡。手术室主手术计划问题属于战术层面,考虑的时间周期通常为周。

主手术计划又可分为分块调度和开放式调度两种策略^[2],分块调度通常面向连台手术,将同一手术小组承担的手术任务集中编排。开放式调度策略是指手术调度按照医生提交的手术计划展开,其中每个手术计划中服务的患者已由医生事先确定,根据医院的手术资源等限制决策医生提交的手术计划的开始时间和地点,分块调度策略更适用于择期患者,手术连台调度在一定程度上提高了效率,医生的手术时间更加集中,从而

更加方便地为医生预留出大块的教学、门诊等时间. 开放式调度策略的优势在于调度方案更加灵活, 但相对分散了医生的手术时间. 两种调度策略在医院均有实际应用.

Denton 等^[84]指出由于手术时间的不确定性, 主手术计划问题是一个具有挑战性的组合优化问题. 文章采用了分块调度策略, 在已知手术患者的情况下, 决策一天需要开放的手术室数量以及患者的手术地点. 文章以最小化运作成本为目标, 提出了手术室分配问题的随机规划模型, 其中运作成本与手术室开放数量和加班时长成正比.

Choi 等^[46]采用分块调度的策略, 将主手术计划问题抽象为报童问题, 决策每个时段的长度以及时段的先后顺序, 文章假定患者的手术时长服从正态分布, 以最小化空闲与加班成本之和为目标建模.

3) 手术排序问题. 手术排序问题在主手术计划制定完成后出现, 决策当日手术的先后顺序, 以使得患者的平均等待时间最短, 或者手术室空闲和加班成本最少. Denton 等^[35]建立了手术排序问题的两阶段随机规划模型, 并提出了基于服务时长方差的手术排序规则有助于降低医护人员的等待时间, 手术室空闲及加班费用的产生.

Cardoen 等^[70]研究了具有独立急诊手术室的患者手术排序多目标优化问题, 文章同时优化了多个目标, 分别为年龄低于 5 岁的患儿优先调度, 曾经停台的手术优先调度, 最小化晚 7 点后康复病房的患者数量, 尽量把距离手术室远的患者优先调度, 最小化麻醉复苏病房中患者数量的峰值, 在模型建立过程中, 给各个目标以规定权重, 将原来的多目标问题转化为单目标问题; 使用优化软件对模型进行求解, 获得了患者的手术开始时间及先后顺序.

Marcon 和 Dexter^[78]研究了两阶段的手术排序问题, 文章指出手术顺序对下游麻醉复苏床位的使用效率造成影响, 设计多种排序规则对每个医生的手术队列进行排序, 建立了离散的事件仿真模型, 仿真结果说明了手术队列的排序规则能有效降低麻醉复苏病房内患者的数量峰值. Hashemi 等^[97]研究了联合手术计划与调度问题, 在安排患者手术日期及手术室的同时, 决策患者手术的开始时间, 建立了基于联合问题的约束规划模型, 并设计分支定价切割 (branch-and-price-and-cut) 算法进行求解.

5 手术室运作管理的研究方法综述

手术室运作管理的最大特点在于手术过程的不确定性和急诊患者到达的随机性. 手术时长受医生技能水平、疲劳程度、患者身体状况等多方面因素影响, 难以准确描述与预测; 此外, 急诊患者的突然到达使得患者对于手术能力的需求无法准确预知. 手术服务和手术需求的内在不确定性给院方手术室管理带来了巨大的困扰, 基于确定性服务时长和需求的手术室管理方案在医院实际运作中往往偏差较大甚至无法实施, 如何增加手术室管理策略的鲁棒性是医院亟待解决的问题. 处理不确定优化问题的研究方法主要包括三类: 仿真、随机规划和鲁棒优化方法.

5.1 仿真方法

仿真方法可以描述多阶段的手术流程及大量的现实场景, 对于解决复杂的医院管理系统具有优势^[52]. 仿真方法主要有两类, 一类是仿真实验方法, 评估不同手术调度系统的性能指标或是研究不同的性能评价指标与可变因素之间的关系, 现实中已有医院的管理部门开发软件包评估自身调度系统的有效性; 另一类使用仿真优化方法, 将仿真与启发式方法相结合优化一系列指定的性能指标, 如手术室的运作成本, 患者的等待时长等.

离散的事件仿真和蒙特卡罗仿真是两种较为常见的仿真方法. 离散的事件仿真是一种动态的方法, 可以描述随着时间的推移事件的变化规律, 经常用于描述复杂的患者流、手术室以及其他资源的使用效率^[98]. Testi 等^[38]建立离散的事件仿真模型, 在考虑患者病情严重程度的情况下, 对患者的手术进行日调度, 将患者视为仿真的实体, 定义了患者实体的四个相关的属性: 期望手术时间、期望入院时间、等待时间及患病类别, 决策患者的手术时间. 蒙特卡罗仿真是一种静态的仿真方法, 经常用于分析和量化不同策略对于患者等待时间、手术停台率等相关指标的影响. Chow 等^[98]使用蒙特卡罗仿真控制床位使用率峰值的大小, 综合考虑手术室和床位联和调度的场景进行优化.

Tanfani 和 Testi^[99]采用仿真优化方法解决手术室管理问题, 将医院手术室管理分为三个子问题: 等待

队列管理、手术室计划与调度、住院区规划与管理。文章以择期和急诊患者作为仿真的对象,在考虑患者服务时间、住院时间以及更新的患者等待时间的情景下,使用离散的事件仿真模型建模患者进入医院手术的全过程,并内嵌手术室调度的优化模型决策每天每个手术小组可占用的手术资源,并将这个仿真优化方法开发成系统,应用于意大利某公立医院手术部。

5.2 随机规划

随机规划^[24,34,40,100]方法通常将不确定参数描述为某种特定分布,以求得基于分布期望的最优,在医院运作管理中是使用最为广泛的建模方法。Denton 等^[65]使用两阶段随机规划方法建模手术室日调度问题,假定院方的手术能力是充足的,等待队列中的所有患者都被安排手术治疗的情况下,决策需要开放的手术室数量和患者的手术地点。Shylo^[101]等采用随机规划方法建模手术调度问题,模型将手术服务时间设定为随机变量,将手术室超时现象构造成机会约束,最大化手术室资源利用率,在随机变量服从正态分布的情况下,简化了机会约束,并开发了启发式求解算法。

Daiki 和 Yuehwern^[39]研究了考虑手术时长不确定性和手术下游重症监护病房的手术调度问题,假定手术时长、患者住院时长和重症监护病房需求服从已知的给定分布,建立了以最小化运作成本为目标的随机规划模型。Mancilla 和 Storer^[47]在考虑手术室单一资源的约束限制下,开发了手术排序问题的随机规划模型,通过采样近似方法,在给定分布下采样随机的手术时长,将原随机规划模型转化成混合整数规划模型,转化后的手术排序模型是 NP 完全的。

5.3 鲁棒优化方法

鲁棒优化是解决系统内部结构或外部环境不确定情境下的一种方法^[102],它可以在有限数据分布信息下进行建模求解,且获得的求解方案抗扰动性强,在手术室管理中具有较好前景。不确定优化问题的鲁棒解是最坏不确定情景下使目标函数具有最优值的解,它的一个重要特点是对于任何具体的情景,鲁棒解只是近似最优解,但是对于整个不确定集合是最优的。传统的优化方法在系统的内部参数或者外部环境变化时往往显得无能为力,得到的优化结果与实际偏差很大。鲁棒优化方法在系统的内部结构和外部环境发生变化时,仍然能够保持系统的功能。因此,鲁棒优化在求解不确定优化问题时凸显了其巨大的优势^[56,72]。

在手术调度系统中,来自手术操作过程、术中突发状况等不确定性都会直接影响到调度方案能否顺利实施。在这些不确定因素的作用下,鲁棒性成为能否确保医院手术部收益和患者服务质量的重要因素。在国际上,鲁棒优化在医院管理中的应用还处于起步阶段。2010年,Denton 等^[65]首次将鲁棒优化方法应用到医院手术室优化调度中,文章考虑了手术时长的不确定性,以最小化手术室运作成本为目标,建立了手术室分配问题的鲁棒优化模型,并理论推导出手术室最优开放数量的上下界表达式。Addies 等^[103]在 Denton 等^[65]工作的基础上,将患者的手术时长表示为对称的区间数,在考虑患者病情紧急程度的情况下,创建了手术调度问题的鲁棒优化模型。2012年,Mannino 等^[91]提出了医院手术班次调度的新型模式,以最小化手术室的超时开放成本为目标建模,使用 light robustness 的方法减小手术需求波动给医院运作成本带来的不利影响;2013年,Holte 和 Mannino^[90]在手术班次调度的模式下,研究了手术室资源的优化分配问题,文章考虑了各科室的患者需求的不确定性,以患者等待的队列最短为目标,建立了问题的鲁棒优化模型,并开发了行列生成算法求解此问题。2015年,Tang 和 Wang^[85]针对科室间的手术室能力分配问题展开研究,以最小化最差情况下手术室资源短缺引发的收益损失为目标,建立了两阶段可调整鲁棒优化模型,并实验证明了相比随机规划方法,鲁棒优化方法控制最差解的优势。Neysabouri 和 Berg^[104]考虑手术时长和使用重症监护病房天数的不确定性,建立了两阶段手术调度问题的鲁棒优化模型,并开发基于列-约束生成方法求得问题的最优解。

6 总结及展望

无论从社会需求还是政府关注的角度来看,医疗运作管理无疑都是重中之重,而手术室运作管理作为其中的关键点和难点,在未来长时间的发展是势不可挡的。本文以医院手术室运作管理环境为背景,概述了手术室管理现状及面临的挑战,从运筹学与系统工程视角给出手术排程的定义,并将手术运作管理问题按照决策内容及调度周期分类,总结了手术运作管理中常见的影响因素、优化目标以及研究方法,综述了国内外的

研究进展. 手术室运作管理是一个源于现实的需要长期关注的科学问题, 吸引了众多学者展开研究, 在过去的几十年中已取得较为丰硕的研究成果; 但由于手术运作环节涉及的部门众多、人员协作复杂、手术时间不确定性及急诊动态到达, 问题十分复杂, 目前的研究仍存在以下局限:

1) 研究对象上, 多数文献面向择期患者展开研究, 较少考虑不同类型、多优先级患者的手术调度策略, 其中患者类型包括择期患者和急诊患者, 急诊患者具有随机到达、救治紧迫性强等特点; 多优先级按照患者病情严重程度及耐受性划分, 例如老人、孩子这一类特殊群体耐受力差, 具有较高优先级. 一些文献 [9, 25] 研究了择期、急诊患者的联合调度问题, 在普通手术室为急诊患者预留一定的手术能力, 但对于预留在哪个时段, 每个时段预留多少研究不足, 多数文献忽略了急诊需求与时间的相关性.

2) 研究问题上, 考虑多阶段手术资源的研究较少. 手术室与各部门、科室的工作流程就像齿轮一样, 紧紧的咬合在一起, 其中一个环节的资源出现问题, 都会影响手术室的工作效率. 例如: 患者术后需要立刻进入麻醉复苏室 (PACU) 观察, 对于病情危重的患者需进入重症监护病房 (ICU), 若 PACU 或者 ICU 床位紧张, 则会影响手术的正常开台, 因此, 考虑多阶段手术资源的联合调度具有现实意义.

3) 研究方法上, 多数文献使用基于随机规划和仿真的方法建模手术室管理系统中的不确定性, 在随机变量准确分布完全已知的情况下获得问题的最终解, 基于鲁棒优化方法的研究较少. 鲁棒优化能获得有限分布信息下的手术调度策略, 具有良好的抗扰动能力, 保证解的质量波动在可控范围内, 适用于患者手术的过程或到达数据不充分, 难以用某种准确分布刻画描述的场景, 具有现实意义.

参考文献

- [1] 罗利, 石应康. 医疗服务资源调度优化理论、方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Luo L, Shi Y K. Optimization in healthcare resource planning and scheduling: Modeling theory, methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 杜少甫, 谢金贵, 刘作仪. 医疗运作管理: 新兴研究热点及其进展 [J]. 管理科学学报, 2013, 16(8): 1-19.
Du S F, Xie J G, Liu Z Y. Progress and prospects in an emerging hot topic: Healthcare operations management[J]. Journal of Management Sciences in China, 2013, 16(8): 1-19.
- [3] Van Oostrum J M, Van Houdenhoven M, Hurink J L, et al. A master surgical scheduling approach for cyclic scheduling in operating room departments[J]. OR Spectrum, 2008, 30(2): 355-374.
- [4] 舒文, 罗利. 基于目标规划的外科手术排程研究 [J]. 技术与市场, 2008, 2: 42-43.
Shu W, Luo L. A comparison study on operation room scheduling rules by using goal programming[J]. Industrial Engineering Journal, 2008, 2: 42-43.
- [5] Erdogan S A, Denton B T. Surgery planning and scheduling[J]. Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 2011: 1-12.
- [6] 王昱, 唐加福. 医院手术调度问题的两阶段鲁棒优化方法研究 [J]. 系统工程学报, 2016, 31(4): 431-440.
Wang Y, Tang J F. A two-stage robust optimization method for solving surgery scheduling problem[J]. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(4): 431-440.
- [7] Penn M L, Potts C N, Harper P R. Multiple criteria mixed-integer programming for incorporating multiple factors into the development of master operating theatre timetables[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(1): 194-206.
- [8] Rachuba S, Werners B. A fuzzy multi-criteria approach for robust operating room schedules[J]. Annals of Operations Research 2017, 251: 325-350.
- [9] May J H, Spangler W E, Strum D P, et al. The surgical scheduling problem: current research and future opportunities[J]. Production and Operations Management, 2011, 20(3): 392-405.
- [10] 钟力炜, 万国华, 唐国春, 等. 建模的艺术: 中国大型医院的手术排程 [J]. 上海医学, 2014, 37(3): 254-258.
Zhong L W, Wan G H, Tang G C, et al. Art of modeling: Scheduling surgical operations in a large hospital in China[J]. Shanghai Medical Journal, 2014, 37(3): 254-258.
- [11] Cardoen B, Demeulemeester E, Beliën J. Operating room planning and scheduling: A literature review[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201: 921-932.
- [12] Pham D, Klinkert A. Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(3): 1011-1025.
- [13] 高岚. 层流净化手术室的使用管理 [J]. 中国煤炭工业医学杂志, 2011, 14(5): 774-775.
Gao L. The management of laminar-flow operating rooms[J]. Chinese Journal of Coal Industry Medicine, 2011, 14(5): 774-775.

- [14] 张宝山. 医疗保障成两会关注热点百姓看病难期望成为历史 [J]. 中国人大, 2005(6): 49–51.
Zhang B S. Medical security has become the focus of the NPC and CPPCC, difficulties of getting medical care are expected to become history[J]. The People's Congress of China, 2005(6): 49–51.
- [15] 侯艳玲, 马静, 马厚芝. 择期手术当日停台原因及分析 [J]. 华西医学, 2014, 29(4): 754–756.
Hou Y L, Ma J, Ma H Z. Cause and analysis of temporarily rescheduled selective operations[J]. West China Medical Journal, 2014, 29(4): 754–756.
- [16] Ma G, Demeulemeester E. A multilevel integrative approach to hospital case mix and capacity planning[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 40(9): 2198–2207.
- [17] Lamiri M, Xie X, Dolgui A, et al. A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(3): 1026–1037.
- [18] Wullink G, Van Houdenhoven M, Hans E W, et al. Closing emergency operating rooms improves efficiency[J]. *Journal of Medical Systems*, 2007, 31(6): 543–546.
- [19] Ferrand Y, Magazine M, Rao U. Comparing two operating-room-allocation policies for elective and emergency surgeries[C]// *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 2010: 2364–2374.
- [20] Van Riet C, Demeulemeester E. Trade-offs in operating room planning for electives and emergencies: A review[J]. *Operations Research for Health Care*, 2015, 7: 52–69.
- [21] Heydari M, Soudi A. Predictive/reactive planning and scheduling of a surgical suite with emergency patient arrival[J]. *Journal of Medical Systems*, 2016, 40(1): 30.
- [22] Adan I J, Bekkers J, Dellaert N, et al. Improving operational effectiveness of tactical master plans for emergency and elective patients under stochastic demand and capacitated resources[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 213(1): 290–308.
- [23] Saghaian S, Hopp W J, Van Oyen M P, et al. Patient streaming as a mechanism for improving responsiveness in emergency departments[J]. *Operations Research*, 2012, 60(5): 1080–1097.
- [24] Gerchak Y, Gupta D, Henig M. Reservation planning for elective surgery under uncertain demand for emergency surgery[J]. *Management Science*, 1996, 42(3): 321–334.
- [25] Troy P M, Rosenberg L. Using simulation to determine the need for ICU beds for surgery patients[J]. *Surgery*, 2009, 146(4): 608–620.
- [26] Roland B, Martinelly C D, Riane F, et al. Scheduling an operating theatre under human resource constraints[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 58(2): 212–220.
- [27] Kharraja S, Albert P, Chaabane S. Block scheduling: Toward a master surgical schedule[C]// *2006 International Conference on Service Systems and Service Management*, 2006, 1–2: 429–435.
- [28] Wang Y, Tang J, Pan Z, et al. Particle swarm optimization-based planning and scheduling for a laminar-flow operating room with downstream resources[J]. *Soft Computing*, 2015, 19(10): 2913–2926.
- [29] Roshanaei V, Luong C, Aleman D M, et al. Collaborative operating room planning and scheduling[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2017, 29(3): 558–580.
- [30] Samudra M, Van Riet C, Demeulemeester E, et al. Scheduling operating rooms: Achievements, challenges and pitfalls[J]. *Journal of Scheduling*, 2016, 19(5): 493–525.
- [32] Gupta D. Surgical suites' operations management[J]. *Production and Operations Management*, 2007, 16(6): 689–700.
- [33] Freeman N K, Melouk S H, Mittenthal J. A scenario-based approach for operating theater scheduling under uncertainty[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2016, 18(2): 245–261.
- [34] Torkki P M, Alho A L, Peltokorpi A V, et al. Managing urgent surgery as a process: Case study of a trauma center[J]. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 2006, 22(2): 255–260.
- [35] Denton B, Viapiano J, Vogl A W, et al. Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty[J]. *Health Care Management Science*, 2007, 10(1): 13–24.
- [36] Ferreira J, Gomes C, Yasin M. Improving patients' satisfaction through more effective utilization of operating rooms resources: An informational-based perspective[J]. *Clinical Governance*, 2003, 16(4): 291–307.
- [37] Velasquez R, Melo M T. A set packing approach for scheduling elective surgical procedures[C]// *Operations Research Proceedings 2005: Selected Papers*. Springer, Berlin, 2005: 425–430.
- [38] Testi A, Tanfani E, Torre G. A three-phase approach for operating theatre schedules[J]. *Health Care Management Science*, 2007, 10: 163–172.
- [39] Daiki M, Yuehwern Y. Scheduling elective surgery under uncertainty and downstream capacity constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 206(3): 642–652.
- [40] Jebali A, Alouane A B H, Ladet P. Operating rooms scheduling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 99(1): 52–62.
- [41] Denton B T, Rahman A S, Nelson H, et al. Simulation of a multiple operating room surgical suite[C]// *Simulation Conference, 2006. WSC 06. Proceedings of the Winter. IEEE*, 2006: 414–424.

- [42] Augusto V, Xie X L, Perdomo V. Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 58(2): 231–238.
- [43] Van Oostrum J M, Bredenhoff E, Hans E W. Suitability and managerial implications of a master surgical scheduling approach[J]. *Annals of Operations Research*, 2010, 178(1): 91–104.
- [44] Cardoen B, Demeulemeester E, Belien J. Sequencing surgical cases in a day-care environment: An exact branch-and-price approach[J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(9): 2660–2669.
- [45] Choi S, Wilhelm W E. On capacity allocation for operating rooms[J]. *Computers and Operations Research*, 2014, 44: 174–184.
- [46] Choi S, Wilhelm W E. An approach to optimize block surgical schedules[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(1): 138–148.
- [47] Mancilla C, Storer R. A sample average approximation approach to stochastic appointment sequencing and scheduling[J]. *IIE Transactions*, 2012, 44(8): 655–670.
- [48] 李晶, 杨松凯. 优化手术室业务流程提升手术台利用率 [J]. *齐鲁医学杂志*, 2010, 4(15): 178–182.
Li J, Yang S K. Increasing utilization rate of operating tables by optimizing operating theatre working process[J]. *Medical Journal of Qilu*, 2010, 4(15): 178–182.
- [49] Fei H, Chu C, Meskens N. Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 112(1): 96–108.
- [50] Van Huele C, Vanhoucke M. Analysis of the integration of the physician rostering problem and the surgery scheduling problem[J]. *Journal of Medical Systems*, 2014, 38(6): 43–59.
- [51] Zhang B, Murali P, Dessouky M M, et al. A mixed integer programming approach for allocating operating room capacity[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2009, 60(5): 663–673.
- [52] Freeman N, Zhao M, Melouk S. An iterative approach for case mix planning under uncertainty[J]. *Omega*, 2018, 76: 160–173.
- [53] Aringhieri R, Landa P, Soriano P, et al. A two level metaheuristic for the operating room scheduling and assignment problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 54: 21–34.
- [54] Liu Y, Chu C, Wang K. A new heuristic algorithm for the operating room scheduling problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 61(3): 865–871.
- [55] Aïda J, Atidel B, Hadj A, et al. Operating rooms scheduling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 99: 52–62.
- [56] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data[J]. *Math Programming (Series B)*, 2000, 88: 411–424.
- [57] Bowers J, Mould G. Ambulatory care and orthopaedic capacity planning[J]. *Health Care Management*, 2005, 8(1): 41–47.
- [58] Bowers J, Mould G. Managing uncertainty in orthopaedic trauma theatres[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 154(3): 599–608.
- [59] Velásquez R, Melo M T. A set packing approach for scheduling elective surgical procedures[J]. *Operations Research Proceedings 2005, Berlin*, 2015: 425–430.
- [60] Cochran J K, Bharti A. Stochastic bed balancing of an obstetrics hospital[J]. *Health Care Management Science*, 2006, 9(1): 31–45.
- [61] Combes C, Meskens N, Rivat C, et al. Using a KDD process to forecast the duration of surgery[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 112(1): 279–293.
- [62] Day R, Garfinkel R, Thompson S. Integrated block sharing: A win-win strategy for hospitals and surgeons[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2012: 1–17.
- [63] Demeester P, Souffriau W, De Causmaecker P, et al. A hybrid tabu search algorithm for automatically assigning patients to beds[J]. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2010, 48(1): 61–70.
- [64] Dexter F, Birchansky L, Bernstein J M, et al. Case scheduling preferences of one surgeon's cataract surgery patients[J]. *Anesthesia & Analgesia*, 2009, 108: 579–582.
- [65] Denton B T, Miller A J, Balasubramanian H J, et al. Optimal allocation of surgery blocks to operating rooms under uncertainty[J]. *Operations Research*, 2010, 58(4): 802–816.
- [66] Wang D J, Liu F, Yin Y Q, et al. Prioritized surgery scheduling in face of surgeon tiredness and fixed off-duty period[J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2015, 30(4): 967–981.
- [67] Everett J E. A decision support simulation model for the management of an elective surgery waiting system[J]. *Health Care Management Science*, 2002, 5(2): 89–95.
- [68] Fei H, Chu C, Meskens N. Solving a tactical operating room planning problem by a column-generation-based heuristic procedure with four criteria[J]. *Annals of Operations Research*, 2009, 166(1): 91–108.
- [69] 白雪, 罗利, 李蓉梅. 医院管理中手术排程研究现状及发展前景 [J]. *管理评论*, 2011, 23(1): 121–128.
Bai X, Luo L, Li R M. The current research and future prospect of surgery scheduling in healthcare management[J]. *Management Review*, 2011, 23(1): 121–128.

- [70] Cardoen B, Demeulemeester E, Belien J, et al. Optimizing a multiple objective surgical case sequencing problem[J]. *International Journal of Production Economics*, 2009, 119(2): 354–366.
- [71] Creemers S, Beliën J, Lambrecht M. The optimal allocation of server time slots over different classes of patients[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 219(3): 508–521.
- [72] Bertsimas D, Pachamanova D, Sim M. Robust linear optimization under general norms[J]. *Operations Research Letters*, 2003, 32: 510–516.
- [73] Beliën J, Demeulemeester E. Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 176(2): 1185–1204.
- [74] Chien C, Tseng F, Chen C. An evolutionary approach to rehabilitation patient scheduling: A case study[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(3): 1234–1253.
- [75] Daiki M, Yuehwern Y. An elective surgery scheduling problem considering patient priority[J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(6): 1091–1099.
- [76] Range T M, Lusby R M, Larsen J. A column generation approach for solving the patient admission scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(1): 252–264.
- [77] Bai J, Fügener A, Schoenfelder J, et al. Operations research in intensive care unit management: A literature review[J]. *Health Care Management Science*, 2016: 1–24.
- [78] Marcon E, Dexter F. Impact of surgical sequencing on post anesthesia care unit staffing[J]. *Health Care Management Science*, 2006, 9(1): 87–98.
- [79] Vijayakumar B, Parikh P J, Scott R, et al. A dual bin-packing approach to scheduling surgical cases at a publicly-funded hospital[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 224(3): 583–591.
- [80] Dexter F, Macario A, Traub R D, et al. An operating room scheduling strategy to maximize the use of operating room block time: Computer simulation of patient scheduling and survey of patients' preferences for surgical waiting time[J]. *Anesthesia & Analgesia*, 1999, 89(1): 7–20.
- [81] Ferrand Y, Magazine M, Rao U S, et al. Building cyclic schedules for emergency department physicians[J]. *Interfaces*, 2011, 41(6): 521–533.
- [82] Bard J F, Purnomo H W. Preference scheduling for nurses using column generation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 16(2): 510–534.
- [83] Jebali A, Hadj Alouane A B, Ladet P. Operating rooms scheduling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 99(1–2): 52–62.
- [84] Denton B T, Miller A J, Balasubramanian H, et al. Optimal allocation of surgery blocks to operating rooms under uncertainty[J]. *Operations Research*, 2010, 58(4): 802–816.
- [85] Tang J, Wang Y. An adjustable robust optimisation method for elective and emergency surgery capacity allocation with demand uncertainty[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(24): 7317–7328.
- [86] Marcon E, Kharraja S, Simonnet G, et al. The operating theatre planning by the follow-up of the risk of no realization[J]. *International Journal of Production Economics*, 2003, 85(1): 83–90.
- [87] Kırış S, Yüzügüllü N, Ergün N, et al. A knowledge-based scheduling system for Emergency Departments[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2010, 23(8): 890–900.
- [88] 周杰, 李军, 郭鹏, 等. 急诊非强占优先权下 Goem/NB/1 排队系统常规病人等待时间及损失率 [J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(8): 2135–2143.
- Zhou J, Li J, Guo P, et al. Goem/NB/1 queueing system with emergency non-preemptive priority-waiting time and loss rate for regular patients[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(8): 2135–2143.
- [89] Addis B, Carello G, Grosso A, et al. Operating room scheduling and rescheduling: A rolling horizon approach[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2016, 28(1–2): 206–232.
- [90] Holte M, Mannino C. The implementor/adversary algorithm for the cyclic and robust scheduling problem in health-care[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 226(3): 551–559.
- [91] Mannino C, Nilssen E J, Nordlander T E. A pattern based, robust approach to cyclic master surgery scheduling[J]. *Journal of Scheduling*, 2012, 15(5): 553–563.
- [92] Van Essen J T, Hans E W, Hurink J L, et al. Minimizing the waiting time for emergency surgery[J]. *Biological Cybernetics*, 2012, 2–3: 34–44.
- [93] Van Oostrum J M, Van Houdenhoven M, Vrielink M M, et al. A simulation model for determining the optimal size of emergency teams on call in the operating room at night[J]. *Anesthesia & Analgesia*, 2008, 107(5): 1655–1662.
- [94] Fügener A, Hans E W, Kolisch R, et al. Master surgery scheduling with consideration of multiple downstream units[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 239(1): 227–236.
- [95] 曹萍萍, 唐加福. 多医生环境考虑患者爽约的门诊预约决策方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(4): 928–936.
- Cao P P, Tang J F. A decision-making method for outpatient appointment with multiple doctors considering no-shows[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2017, 37(4): 928–936.
- [96] Ceschia S, Schaerf A. Dynamic patient admission scheduling with operating room constraints, flexible horizons, and patient delays[J]. *Journal of Scheduling*, 2016, 19(4): 377–389.

- [97] Hashemi D S H, Rousseau L M, Pesant G. A constraint-programming-based branch-and-price-and-cut approach for operating room planning and scheduling[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2016, 28(3): 432–448.
- [98] Chow V S, Puterman M L, Salehirad N, et al. Reducing surgical ward congestion through improved surgical scheduling and uncapacitated simulation[J]. *Production and Operations Management*, 2011, 20(3): 418–430.
- [99] Tànfani E, Testi A. Improving surgery department performance via simulation and optimization[C]// *Health Care Management (WHCM), 2010 IEEE Workshop*, 2010: 1–6.
- [100] 袁彪, 刘冉, 江志斌, 等. 随机服务时间下的家庭护理人员调度问题研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(12): 3083–3091.
Yuan B, Liu R, Jiang Z B, et al. Home care crew scheduling problems under service time uncertainty[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(12): 3083–3091.
- [101] Shylo O V, Prokopyev O A, Schaefer A J. Stochastic operating room scheduling for high-volume specialties under block booking[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2012, 25(4): 682–692.
- [102] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust solutions of uncertain linear programs[J]. *Operations Research Letters*, 1999, 25(1): 1–13.
- [103] Addies B, Carello G, Tànfani E. A robust optimization approach for the operating room planning problem with uncertain surgery durations[C]// *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, 2014, 61: 185–189.
- [104] Neyshabouri S, Berg B P. Two-stage robust optimization approach to elective surgery and downstream capacity planning[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 260: 21–40.