

清华大学优秀博士学位论文丛书

人员交互运动对呼吸道传染病 传播机理的影响研究

吴家麟 (Wu Jialin) 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

以呼吸道传染病为代表的突发公共卫生事件,对公共安全和人类健康构成了严重威胁。人员交互运动会显著影响传染病的传播模式。本书聚焦呼吸道传染病的空气传播机理、人员交互运动中的气流特性、个体暴露与区域风险及多人动态风险评估等科学问题,系统探讨了人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响。书中阐述了呼吸道传染病的传染源特征与传播机理,量化了传染性物质从患者呼吸道不同部位呼出与扩散的特性差异,揭示了动态场景下呼吸道传染病空气传播的特点与规律;构建了全尺寸人员交互运动实验平台与多姿态数值人体模型库,阐明了交互运动引起的瞬态气流特性及其对呼吸道传染病传播的影响规律;建立了多人动态场景的区域风险评估方法,为人员密集场所的呼吸道传染病动态风险评估和防控策略制定提供了技术支撑。

本书适合安全科学与工程、建筑技术科学、公共卫生、职业健康、公共安全与应急管理等相关领域的高校师生、科研院所研究人员及相关技术人员阅读和参考。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响研究 / 吴家麟著. -- 北京:清华大学出版社, 2026. 9. -- (清华大学优秀博士学位论文丛书). -- ISBN 978-7-302-72715-6

I. R56

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026AC9152 号

责任编辑:樊 婧

封面设计:傅瑞学

责任校对:欧 洋

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市东方印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:11 字 数:181 千字

版 次:2026 年 9 月第 1 版 印 次:2026 年 9 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

产品编号:111206-01

一流博士生教育

体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神,特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神,不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际,通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己,敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国

和欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生,转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权力和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生导师资格确认方面,不能论资排辈,更要看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来,学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题,寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12 000多场,参与博士生达38 000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18 000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校从多年前就已开始运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,拓宽博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,汲取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。



清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

欣悉吴家麟博士的学位论文《人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响研究》即将由清华大学出版社出版,作为其博士阶段的指导教师,我深感欣慰,也愿借此机会对本书作简要介绍和推荐。

呼吸道传染病始终是威胁人类健康和公共安全的重要问题。COVID-19 大流行使人们更加深刻地认识到,深入理解此类疾病的传播规律,对于提升公共卫生治理能力和构建韧性社会具有重要意义。与传统基于静态或均匀混合假设的研究不同,现实场景中的人员移动、接近、交谈等交互行为会显著改变局部空气流场和病原体扩散过程,从而影响传播风险。如何定量揭示人员交互运动对呼吸道传染病空气传播机理的影响,是安全科学、公共卫生、建筑环境等交叉领域的重要科学问题。

本书围绕上述问题展开系统研究,聚焦人员交互运动对呼吸道传染病空气传播过程的影响,综合采用实验测量、数值模拟和风险评估等方法,较为深入地揭示了动态场景下“人员运动—空气流动—病原传播—暴露风险”之间的耦合关系,形成了较系统的研究成果。

本书较有特点的地方,主要体现在以下几个方面。

首先,在研究方法上,作者构建了全尺寸人员交互运动模拟平台与瞬态测量平台,发展了多姿态数值人体模型和相应的计算流体力学研究方法,并建立了适用于动态场景的室内风险时空分布研究方法。这些工作为人员交互运动条件下呼吸道传染病传播机理研究提供了较好的方法和工具支撑。

其次,在空气传播机理认识方面,本书不仅关注宏观传播现象,也从传染源释放特征出发,分析了呼吸道不同部位释放的传染性物质在扩散和暴露上的差异,进一步揭示了近距离和远距离空气传播过程中气溶胶的重要作用。相关结论有助于深化对呼吸道传染病空气传播过程的认识。

再次,在人员交互运动影响规律方面,本书系统研究了交互运动对个体暴露和区域风险的作用,揭示了交互瞬间与持续交互对暴露风险影响的差异,提出了人员交互运动可能导致高风险区域扩大的“增强效应”,并分析了

不同交互距离、运动速度、人员姿态和通风条件下的影响规律。这些研究既为理解动态人员行为对传播风险的作用提供了新的视角,也为安全社交距离、通风组织优化等提供了参考依据。

此外,本书进一步将研究拓展到多人交互运动场景,分析了尾流融合、室内对流增强及高风险区域扩展等现象,建立了多人交互运动条件下的区域动态风险评估方法,量化了人员数量和空间分布对传播风险的影响。这使研究结果更加贴近人员密集公共空间的真实情境,具有较好的应用意义。

总体来看,本书不仅在基础研究层面深化了对呼吸道传染病空气传播及人员行为耦合作用机制的理解,也在方法上为公共卫生与公共安全领域开展动态场景风险量化研究提供了有益参考。相关研究成果对于公共场所感染风险评估、通风系统优化设计以及突发公共卫生事件防控策略制定等,均具有一定的理论意义和实践价值。

本书是在吴家麟博士的学位论文基础上进一步整理、补充和完善而成的,内容系统,论述清晰,具有较好的学术价值和应用意义。相信本书的出版,能够为安全科学与工程、建筑环境、公共卫生等相关领域的研究者、工程技术人员和管理工作者提供有益参考。也期待吴家麟在今后的工作中,继续保持对问题的敏感、对研究的专注和对学术的热情,在相关领域不断取得新的进展。

翁文国

清华大学安全科学学院

2026年7月

摘 要

呼吸道传染病严重威胁人类健康与公共安全,而人员交互运动会显著影响呼吸道传染病的传播规律。本书以阐明人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响为目标,针对呼吸道传染病空气传播机理、人员交互运动气流特性、人员交互运动对个体暴露与区域风险的影响、多人交互运动气流与动态风险评估等关键科学问题开展研究,深入阐明了人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响规律,为制定呼吸道传染病的防控策略提供理论指导和基础数据。主要内容如下:

构建了人员交互运动对呼吸道传染病传播机理影响的研究方法,为动态场景传播机理研究提供工具。建立了全尺寸人员交互运动模拟平台与瞬态测量平台,构建了多姿态数值人体模型与人员交互运动的计算流体力学方法,建立了人员交互运动对室内风险时空分布影响的研究方法,为全面开展人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响研究提供了工具支撑。

探究了呼吸道传染物质沿“患者呼吸道—空气—易感者吸入”的空气传播机理。结合传染源特性,量化了传染物质从患者呼吸道不同部位呼出与扩散的特性差异,揭示了喉部释放的病毒导致更高的室内人员暴露风险的成因,发现了近距离、远距离空气传播途径导致的感染风险均由气溶胶主导,以及远距离空气传播风险不可忽视等特征,为动态场景下的呼吸道传染病传播机理研究提供了理论支撑。

揭示了人员交互运动的气流特性及其对呼吸道传染病传播机理的影响规律。揭示了人员交互运动对个体暴露的瞬态影响与持续影响的差异,发现了交互瞬间个体呼吸暴露降低,而持续的人员交互运动会增加暴露与感染风险等规律。提出了人员交互运动导致呼吸道传染病传播的高风险区域扩大的“增强效应”,分析了成因与对策。深入研究了不同交互距离、运动速度、人员姿态、通风条件下的人员交互运动的影响规律,阐明了人员交互运动气流特性及其对呼吸道传染病空气传播的增强作用,为制定安全社交距离、设计通风策略等重要科学问题提供了科学依据。

揭示了多人交互运动的尾流融合、强室内对流、促进远距离空气传播、导致高风险区域扩大等特征。建立了多人交互运动场景的区域动态风险评估方法,发现了交互运动人数、人员位置分布等因素对室内流场与呼吸道传染病传播的显著影响规律,拓展了“增强效应”的粒径范围,为人员密集场所呼吸道传染病风险评估与防控策略制定提供了技术与方法指导。

关键词: 人员安全; 呼吸道传染病传播; 人员暴露; 交互气流; 风险评估

Abstract

Respiratory infectious diseases seriously threaten human health and public safety, and interactive human movement can significantly affect the spread of respiratory infectious diseases. This thesis aims to elucidate the influence of interactive human movement on the transmission mechanism of respiratory infectious diseases and research on critical scientific issues, such as the airborne transmission mechanism of respiratory infectious diseases, airflow characteristics of interactive human movement, the impact of interactive human movement on individual exposure and regional risk, multi-person interactive movement airflow, and regional dynamic risk assessment. The impact of interactive human movement on the transmission mechanism of respiratory infectious diseases was revealed. It provides theoretical guidance and primary data for formulating control strategies for respiratory infectious diseases. The main contents are as follows:

A research method on the influence of interactive human movement on the transmission mechanism of respiratory infectious diseases was established to provide tools for studying the transmission mechanism in dynamic scenarios. A full-scale experiment platform for interactive human movement and a transient measurement platform were constructed. Multi-attitude three-dimensional numerical respiratory human models were constructed. A computational fluid dynamics (CFD) method for the interactive human movement was established. The research method of the influence of interactive human movement on the spatial and temporal distribution of indoor risk was established. They provided tool support for comprehensively studying the influence of interactive human movement on the airborne transmission mechanism of respiratory infectious diseases.

The typical airborne transmission process of infectious substances along the “patients’ respiratory tract-air-inhalation of susceptible people” was explored. Considering the infectious source characteristics, the differences in exhalation and diffusion characteristics of infectious substances from different parts of a patient’s respiratory tract were quantified. It was found that the virus released from the larynx might cause a higher exposure dose in indoor environment. The respiratory exposure risk of susceptible persons was found to be dominated by aerosols both in the short-range and long-range airborne transmission routes. The long-distance airborne transmission risk was clarified as non-negligible. These findings provide theoretical support for studying the airborne transmission mechanism of respiratory infectious diseases in dynamic scenarios.

The airflow characteristics of interactive human movement and its influence on respiratory infectious diseases’ transmission were revealed. The mechanism and differences between interactive human movement’s transient effect and continuous effect on individual respiratory exposure were quantitatively revealed. Individuals’ respiratory exposure decreased briefly during interactive movement, while continuous interactive human movement increased respiratory exposure and infection risk. The “enhancement effect” that interactive human movement leads to expanding the high-risk area of respiratory infectious diseases was proposed and verified. The causes and countermeasures were discussed. The influence of interactive human movement under different interactive distances, movement speeds, human postures, and ventilation conditions was studied. Moreover, the airflow characteristics of human interactive movement and its enhancement to the transmission mechanism of respiratory infectious diseases were expounded, providing a scientific basis for formulating safe social distancing and designing ventilation strategies and other critical scientific issues.

The multi-person interactive movement’s characteristics of wake fusion, strong indoor convection, promoting long-range airborne transmission, and expanding high-risk areas were revealed. A regional

dynamic risk assessment method was established for multi-person interactive movement scenes. It was found that the number and the location distribution of moving people significantly influence the indoor airflow field and the spread of respiratory infectious diseases. The particle size range of the “enhancement effect” was expanded. It provides technical guidance for risk assessment of respiratory infectious diseases in crowded places and developing control strategies.

Keywords: human safety; respiratory infectious diseases transmission; personnel exposure; interactive airflow; risk assessment

符号与缩略语说明

ACH	每小时换气次数
CFD	计算流体力学
DPM	离散相模型
F_b	布朗力
F_d	阻力
F_g	重力
F_s	萨夫曼升力
h	对流换热系数
k	湍流动能
L_1	采样区域到坐姿暖体呼吸假人口部的距离
L_2	移动假人左手到坐姿暖体呼吸假人口部的距离
MM	站姿移动假人
Q	呼吸强度
Q_{IP}	患者的病毒释放速率
R	患者呼出的气溶胶的高风险区域范围
R_l	患者呼出的气溶胶的高风险区域范围(横向)
R_f	患者呼出的气溶胶的高风险区域范围(前方)
STBM	坐姿暖体呼吸假人
STM	组分输运模型
t	时间
u_p	液滴速度
v	人员运动速度
v_{air}	气流速度
y^+	第一层网格无量纲壁面单位数
ϵ	湍流动能耗散率

ρ	流体密度
ρ_i	液滴密度
ω	湍流比耗散率
σ_ω	ω 参数的湍流普朗特数



文中标注彩图
请扫码查阅

目 录

第 1 章 引言..... 1

1.1 选题背景及意义 1

1.1.1 选题背景..... 1

1.1.2 研究目的与意义..... 3

1.2 国内外研究现状 3

1.2.1 呼吸道传染病空气传播机理研究..... 4

1.2.2 人员运动对流场与污染物扩散影响的实验研究..... 9

1.2.3 人员运动对流场与污染物扩散影响的数值模拟研究 ... 13

1.2.4 研究现状总结 17

1.3 研究内容与技术路线..... 18

1.4 本书结构安排..... 19

第 2 章 人员交互运动实验与数值模拟方法研究 22

2.1 本章引论..... 22

2.2 人员交互运动实验平台搭建与实验设计..... 23

2.2.1 实验平台与设备仪器 23

2.2.2 实验设计与技术路线 26

2.3 人员交互运动数值模拟方法..... 27

2.3.1 多姿态三维数值人体模型构建 27

2.3.2 人员交互运动的 CFD 动网格方法..... 29

2.3.3 流场计算的湍流模型与方法 31

2.4 本章小结..... 34

第 3 章 呼吸道传生物质释放与空气传播机理研究 36

3.1 本章引论..... 36

3.2 近距离空气传播机理研究..... 37

3.2.1	患者呼气过程病毒液滴在其呼吸道内部的沉积与呼出	39
3.2.2	室内近距离空气传播机理与个体暴露评估	43
3.3	远距离空气传播机理研究	46
3.3.1	空间流场与液滴轨迹分布	48
3.3.2	病毒液滴沉积分布	50
3.4	室内空气传播风险量化与通风影响研究	52
3.4.1	个体与区域风险评估方法	54
3.4.2	风险分布与通风的影响分析	55
3.5	本章小结	59
第4章	人员交互运动气流特性与对个体暴露的影响研究	61
4.1	本章引论	61
4.2	研究思路	61
4.2.1	人员交互运动对个体暴露的影响研究方案	61
4.2.2	人员交互运动气流特性及影响研究方案	64
4.3	人员交互运动对个体暴露的影响规律	69
4.3.1	静态场景个体呼吸区环境本底气溶胶浓度	69
4.3.2	人员交互运动场景个体呼吸暴露变化规律	70
4.3.3	人员交互运动对呼吸暴露影响的瞬态效应与持续效应	73
4.4	人员交互运动气流特性与区域风险变化规律	74
4.4.1	近距离人员交互运动气流特性	74
4.4.2	人员交互运动气流随交互距离的变化	79
4.4.3	人员交互运动气流随运动速度的变化	81
4.4.4	区域风险变化规律	83
4.5	本章小结	88
第5章	人员交互运动对高风险区域的影响研究	89
5.1	本章引论	89
5.2	研究思路	89
5.2.1	荧光气溶胶沉积实验研究方案	89
5.2.2	室内瞬态流场测量设计	93

5.3	气溶胶沉积与高风险区域分析.....	95
5.3.1	通风不良室内的高风险区域的变化规律	95
5.3.2	人员交互运动对高风险区域的增强效应	97
5.3.3	通风量对高风险区域的影响结果分析	98
5.4	人员交互运动场景室内流场变化规律.....	99
5.4.1	不同通风量情况下人员交互运动引起的 室内流场变化	99
5.4.2	持续交互运动与单次交互运动的瞬态气流差异.....	100
5.5	本章小结	102
第 6 章	多人交互运动对呼吸道传染病传播的影响研究.....	104
6.1	本章引论	104
6.2	研究思路	104
6.2.1	多人场景构建与交互运动的实现.....	104
6.2.2	人员位置分布与计算流程.....	106
6.3	结果与讨论	109
6.3.1	多人交互运动瞬态气流特性.....	109
6.3.2	多人交互运动对流场的影响分析.....	111
6.3.3	多人交互运动对患者呼出液滴扩散的影响分析.....	116
6.3.4	多人交互运动场景动态风险评估.....	119
6.4	本章小结	122
第 7 章	总结与展望.....	124
7.1	工作总结	124
7.2	创新点	128
7.3	展望	128
参考文献		130
在学期间发表的学术论文		148
致谢		150

第 1 章 引 言

1.1 选题背景及意义

1.1.1 选题背景

公共安全是人民幸福生活的基本需求^[1]。威胁公共安全的突发事件主要分为四类,包括自然灾害、事故灾难、社会安全事件与公共卫生事件^[2]。其中公共卫生事件与人民健康密切相关,不仅可能造成人员伤亡,还易引起社会恐慌。随着城镇化进程的推进,室内人员密集场所增多,为公共卫生事件的发生,尤其是传染病的暴发提供了条件^[3]。在地震、洪涝等自然灾害或火灾、爆炸等事故灾难发生后,受灾人员生活、居住卫生条件恶化,传染病流行风险也会增加。

在各类传染病中,呼吸道传染病具有在空气中传播的特征,其传染性强、传播范围广、防控难度大,对人员安全的威胁日益增大。20 世纪在全球范围传播的流感导致数千万人死亡,造成了巨大损失,阻碍了社会的进步与发展^[4]。进入 21 世纪以来,呼吸道传染病频发,给经济社会与民众身心健康造成了巨大代价。2003 年的非典型病原体肺炎(简称“非典”,SARS)疫情在全球二十多个国家和地区流行,导致超过 8000 人感染,800 余人死亡,致死率很高^[5]。2009 年的甲型 H1N1 流感病毒疫情在美国暴发并蔓延到全球,造成 20 余万人死亡^[6]。2012 年中东呼吸综合征(Middle East respiratory syndrome,MERS)暴发,蔓延 27 个国家,导致韩国上千所中小学关停^[7]。2019 年年末暴发的新型冠状病毒肺炎(简称“新冠肺炎”,COVID-19)疫情,至今仍在全球流行,影响着民众的生活^[8]。根据世界卫生组织(World Health Organization,WHO)的统计数据,截至 2023 年 2 月,全世界已有超过 7 亿人感染 COVID-19,超过 680 万人死亡^[9]。

在现代生活中,人类 80% 以上的时间是在室内环境度过的^[10],室内空气质量对人体健康影响很大^[11]。与室外相比,室内是呼吸道传染病等公共卫生事件的高发场所,呼吸道传染病在室内人际传播屡见不鲜^[12-14]。

2003 年 SARS 疫情暴发后,许多学者针对呼吸道传染病的传播机理及主要影响因素开展了研究,取得了一些进展。Morawska 等研究了液滴在室内的扩散规律与人员暴露评估方法^[15-17]; Qian 和 Li 等研究了室内通风对呼吸道传染病传播机理的影响^[18-20]; Melikov 等研究了个性化通风、空气净化等降低室内风险的措施^[21-23]; Xie 和 Wei 等研究了人员呼出液滴的粒径分布与传播距离^[24-26]; Liu 等提出了呼吸道传染病的近距离空气传播机制^[27]。然而,直到 COVID-19 暴发前,学界对于呼吸道传染病的空气传播机理仍存在争议,仅有几种导致了跨房间人员感染的传染病被普遍承认具有空气传播特征^[28]。2020 年以来,在 COVID-19 大流行下的跨学科研究显示,空气传播很可能是呼吸道传染病的主要传播途径^[29-31]。大量学者结合实际案例,针对呼吸道传染病的空气传播规律开展了研究^[32-35]。李玉国等总结了新冠肺炎病毒的主要传播途径,提出近距离空气传播是导致交叉感染的主要原因^[36],而远距离空气传播是近距离空气传播的延续^[37]。目前学术界^[38-40]与 WHO^[41]等官方机构也已广泛认可了呼吸道传染病的空气传播途径,如图 1.1 所示。

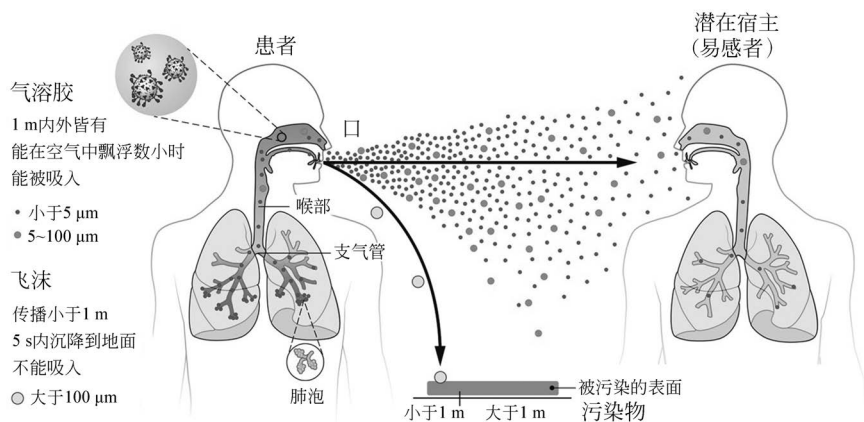


图 1.1 呼吸道传染病的空气传播机理示意图^[38]

呼吸道传染物质的空气传播过程通常由室内气流主导,人员运动行为对室内气流与传染物质的传播有显著影响^[42-44]。在 SARS 疫情期间,一趟航班上发生了跨越七排座椅的传染案例,被推测与机组人员的走动有关^[45]。在报道的新冠肺炎传染案例中,也出现了多起与患者的近距离交互运动导致的感染^[46-48]。然而,现有的针对呼吸道传染病空气传播机理的研

究通常基于静态场景,相关建议如安全社交距离也未考虑到动态场景中人员运动因素的影响^[49-51]。最近一项针对机舱内呼吸道传染病传播风险评估的研究显示,考虑人员运动的风险评估模型比传统静态场景的模型能更好地解释呼吸道传染病的传播模式^[52]。研究表明,在开展动态场景研究时,人体周围微环境的变化规律是重点^[53]。人员交互运动场景中气流变化迅速,可能显著影响呼吸道传染物质的扩散与人员风险。然而,这一过程的瞬态气流特性与对呼吸道传染病的传播机理的影响尚未得到深入研究。

1.1.2 研究目的与意义

呼吸道传染病引起的公共卫生事件显著影响着人类的生活与生产。在呼吸道传染病频发的室内场所,人员交互运动会改变流场与患者呼出的传染物质的扩散规律,影响区域风险。因此,应针对此类动态场景的室内气流特性与传染物质传播机理开展详细研究。本书研究的“人员交互运动”主要指运动人员与其他个体尤其是患者发生的较近距离的交互运动,“传染物质”指患者呼出的携带呼吸道传染病病原体(病毒、细菌等)的液滴。探究人员交互运动场景的气流特性及其对传染物质扩散过程的影响,有助于从根本上解释和预测呼吸道传染病在动态场景的传播规律,指导风险评估和防护措施设计,促进公共安全。

本书聚焦人员交互运动气流特性及其对呼吸道传染病的传播机理的影响开展研究,旨在解决以下问题:①人员交互运动气流特性;②人员交互运动对个体呼吸暴露、传染物质扩散、区域风险的影响;③多人交互运动气流特性及其对呼吸道传染病传播机理的影响;④动态场景呼吸道传染病传播机理与动态风险评估方法。本书将综合使用流体力学、气溶胶动力学、传热传质学、风险评估等相关学科方法,采取全尺寸实验、数值模拟、理论分析等技术手段,深入探究人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响规律,量化动态场景个体暴露与区域风险变化规律,为呼吸道传染病的防控策略制定提供科学依据。

1.2 国内外研究现状

在过去几十年间,学者针对呼吸道传染病的传播机理、人员运动行为对室内气流与传染物质传播的影响开展了大量研究,取得了一些进展。

研究传染病传播机理是开展风险评估与设计防控措施的基础。通常认

为,传染病的流行需要同时具备传染源、传播途径、易感人群三个要素^[54]。对于呼吸道传染病,传染源主要是指已感染的患者及其产生的传染物质;传播途径是指传染物质离开传染源到达易感染者的途径与媒介,主要包括接触传播、飞沫传播与空气传播三类^[36];易感人群则是指对该传染病缺乏特异性免疫力的易感染者群体。近年来的研究显示,空气传播很可能是呼吸道传染病的主要传播途径。与接触传播、飞沫传播途径相比,空气传播过程机理更加复杂,对防控的要求也更高^[55]。因此,本书针对呼吸道传染病传播机理的研究重点围绕空气传播途径展开。

传染物质的空气传播由气流主导,而人类活动会显著改变室内气流并影响传染物质的扩散过程^[56]。随着呼吸道传染病频发,近年来针对人员运动行为对呼吸道传染病传播的影响的研究引起学界广泛关注,但相关研究尚不充分。在过去二十余年间,学者针对人员运动对气体、颗粒污染物扩散机理的影响开展了许多研究,相关成果为开展人员交互运动对传染病传播的影响规律研究提供了重要参考。根据研究方法不同,这些研究主要分为实验研究与数值模拟研究两类。

本节将从呼吸道传染病空气传播机理研究、人员运动对流场与污染物扩散影响的实验研究、数值模拟研究三个方面对国内外研究进展进行梳理与总结。

1.2.1 呼吸道传染病空气传播机理研究

在较长的历史时期中,接触传播与飞沫传播被认为是呼吸道传染病的主要传播途径,而空气传播途径被认为可忽略。直到1962年在针对结核病暴发的研究中,空气传播途径才开始引起重视^[57],但接触传播与飞沫传播是主要传播途径的观点仍在一段时间内占据主流。在COVID-19大流行的背景下,近几年大量学者针对呼吸道传染病的传播规律开展了研究^[29,32,36,58-60],许多证据显示空气传播很可能是呼吸道传染病的主要传播途径^[28,31],且远距离空气传播是近距离空气传播的延续^[37]。如图1.2所示,相关研究主要围绕传染源特性、空气传播途径、易感人员暴露与风险评估方法展开。

(一) 呼吸道传染物质的源特性

呼吸道传染病的病原体(病毒、细菌等)通常在患者呼吸道内复制,通过患者的呼吸活动(呼吸、说话、咳嗽、打喷嚏等)进入环境^[38,61]。病原体的粒径大多在纳米至微米范围,如COVID-19病毒粒径为60~140 nm^[62],流感

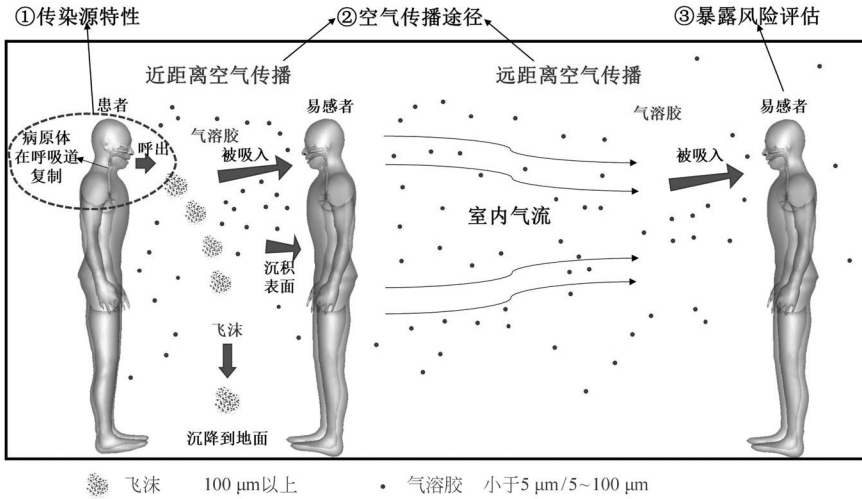


图 1.2 呼吸道传染病空气传播机理研究：传染源、空气传播途径、风险评估

病毒粒径为 $80\sim 500\text{ nm}$ ^[63]。这些病原体通常需要附着在载体上进行空气传播,而呼吸活动产生的飞沫和气溶胶(统称“液滴”)是典型的载体^[64]。携带传染物质的液滴在环境中悬浮、蒸发和扩散,可能沉积在物体或人体表面,或被人体吸入,造成感染风险^[65]。

患者的呼吸活动产生的液滴粒径和浓度特征是影响其扩散特性的关键因素^[66]。过去几十年间,学者针对呼吸^[67-68]、说话^[16,69]、咳嗽^[25,70]、打喷嚏^[71-72]、唱歌^[73-74]等呼吸相关行为分别研究了呼出液滴的粒径分布、数量、浓度、速度等特征。在实验研究方法上,早期研究主要采用高速相机、固体冲击、液体冲击等;随着技术发展,使用光学粒子计数器、空气动力学粒子计数器、激光粒度分析仪、电迁移粒径谱仪等测量手段的研究逐渐丰富。从结果看,患者呼出液滴的粒径分布存在个体差异,但大多为 $0.05\sim 500\text{ }\mu\text{m}$,特别是集中在 $0.1\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ ^[30,75-77]。一些学者考虑蒸发过程,综合实验与计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法研究了液滴初始粒径、蒸发时间、环境相对湿度与最终粒径的关系,建立了拟合曲线,并表明液滴蒸发后的最终粒径通常为初始粒径的 $1/3$ 左右^[26,78-80]。在 COVID-19 大流行中,许多学者针对患者呼出的病原体进行了收集与分析,其中多数研究在室内环境与医疗保健环境中进行,包括对空气与环境的采样。收集机制有撞击滤尘器、旋风分离器、冲击器、过滤器、水基冷凝和被动采样等,使用 RT-PCR 方法检测采集样本中的 SARS-CoV-2 RNA^[81]。随

着口罩的普遍使用,许多学者定量研究了佩戴口罩对降低呼出液滴数量与限制气溶胶扩散范围的作用^[72,74,82]。总体而言,患者呼出的传染物质的粒径分布存在个体差异,且受呼吸活动类型与人员运动状态影响^[83],针对具体案例的研究需要个性化分析。

值得注意的是,不同类型呼吸道传染病的病原体在患者呼吸道内的复制与脱落部位存在差异,如 SARS 病毒通常在患者的肺部复制,而 COVID-19 病毒会在患者的喉部独立复制和脱落^[84]。从肺部释放的颗粒在呼出过程中有较高比例会沉积在喉部^[85]。COVID-19 与 SARS 虽具有许多相似性,但感染 COVID-19 的人数却远高于 SARS。这些现象提示了一种可能:病原体在患者呼吸道复制部位的差异可能影响其呼出情况,进而影响环境中易感者暴露风险。然而现有研究通常仅将患者的口或鼻表面作为传染物质释放位置,针对病原体在呼吸道内部释放部位差异的影响研究尚不充分。事实上,明确病原体在患者呼吸道的呼出过程,是评估其室内传播规律与易感个体暴露风险的基础,对于科学采取防护措施具有重要参考价值。

(二) 呼吸道传染病的空气传播途径

空气传播通常也称气溶胶传播,指患者呼出的具有传染性的气溶胶、对患者采取医疗过程产生的气溶胶在空气中传播至被易感者吸入^[86]。过去几十年间,学界针对呼吸道传染病的空气传播机理开展了大量实验研究^[38,57,87-91],发现了麻疹、流感和 COVID-19 等呼吸道传染病空气传播的证据,并基于研究结果提出了相关推论与假设。其中,Richard 等通过动物实验验证了新冠病毒能在空气中传播^[92];Milton 等^[88]与 Alsved 等^[93]通过实验采样,在流感患者与 COVID-19 患者呼出的气溶胶中检测到病毒 RNA,并发现小于 5 μm 的气溶胶中病毒含量很高。此外,在 COVID-19 患者病房或生活环境的空气中也检测到了病毒^[94]。随着证据增多,WHO 等官方组织接受了空气传播是 COVID-19 的重要传播途径这一论断^[41],将其定义为“由远距离、长时间悬浮在空气中且仍具传染性的飞沫核/气溶胶的扩散而导致感染因子的传播”。

由于传播过程的相似性,飞沫传播与空气传播途径常被混淆。现有研究对二者的区分依据主要是粒径差异,大颗粒通常被划分为飞沫,小颗粒被划分为气溶胶。飞沫通常主要受重力影响,扩散距离较短,而气溶胶可能长时间悬浮,导致远距离传播^[95]。然而,粒径分界依据尚存在争议。在较长一段时间里,学界以是否会在被呼出后 1~2 m 内沉降到地面这一特性作

为划分依据,普遍以 $5\text{ }\mu\text{m}$ 作为飞沫传播与气溶胶传播途径的分界线。随着研究深入,学者发现这一区分方式可能不准确^[96]: 不仅小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶具有远距离空气传播的可能,部分 $5\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 的中等粒径的液滴同样具有在空气中悬浮较长时间并被易感者吸入导致交叉感染的可能性。特别是考虑到部分飞沫在沉降前会蒸发成为飞沫核,最终粒径与气溶胶相似,因此实际的飞沫与气溶胶的分界粒径估计在 $60\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ ^[24],并取决于具体条件,如环境温度、湿度等因素^[97-100]。目前一般认为,小于 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶可在空气中悬浮超过一分钟^[38],而 $30\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 的液滴只在患者附近被吸入并仅沉积在上呼吸道,大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的飞沫通常不会被直接吸入。从空气动力学角度看,微小气溶胶被吸入后进入肺部的概率更大,可能导致下呼吸道肺泡组织感染。Chen 等的研究显示,由于飞沫沉积并可能导致易感者感染的区域(眼膜、口、鼻)面积仅占头部正面区域面积的约 1.15% ^[101],因此即使在近距离暴露中,也很可能是小粒径气溶胶的空气传播途径主导感染风险^[102]。此外,流感患者呼出的气溶胶中病毒含量约为大液滴中的 8.8 倍^[88],且在 COVID-19 患者中也有相似发现: 患者呼出的病毒 RNA 超过 90% 存在于气溶胶中,提示了病毒气溶胶在 COVID-19 传播过程中的作用^[93]。这些研究表明,空气传播途径在呼吸道传染病的传播过程中很可能扮演了重要角色。

影响传染物质空气传播过程的因素很多,如呼吸气流速度、通风、行走等人类活动,其中的关键是室内气流^[26,52,103]。研究表明,呼吸道传染病的感染多发生在通风不良的室内场景^[12,104],而室外空气传播概率明显低于室内环境^[105]。此外,置换通风环境中的温度分层还可能导致患者呼出的传染物质集中在呼吸区高度,增加易感人员的风险^[106-108]。总体而言,气流对传染物质的传播范围与区域风险影响显著。无风时在静态场景中患者呼出的病毒液滴的浓度会在 $1\sim 2\text{ m}$ 内迅速下降,被 Liu 等称为“邻近效应”^[27]。然而在有风的情况下,部分液滴传播距离可达 6 m 以上^[109]。因此,在研究传染物质传播机理时,需要重点关注室内流场特征及变化规律。此外,患者呼出传染物质时的气流速度也会影响传染物质的传播距离,如患者打喷嚏时释放的液滴由于高初始速度(大于 15 m/s ^[110])可能传播超过 8 m ^[111]。

综上,许多学者通过实验与数值模拟研究,阐明了呼吸道传染病在静态室内场景空气传播的基本规律。在此基础上,Ai 等针对近距离暴露场景下的换气率、相对位置、距离、室内气流等因素对个体瞬态暴露的影响开展研

究,发现在短期交互事件中个体暴露变化明显,表明基于稳态场景的研究结论未必适用于非稳态场景^[112-114]。在传播机理研究的基础上,一些学者探索了防护措施的影响。针对传染源控制,Feng等研究了口罩等防护措施对传染物质传播范围与安全距离的影响^[95,115-117]。在室内通风与气流控制方面,个性化通风^[118-120]、气幕^[121]等手段表现出了良好的应用前景。在物理阻隔方面,Ye等研究了在教室、食堂等场景使用隔板对降低感染风险的效果^[122-125]。在降低病原体活性研究方面,学者针对紫外线^[126]、光催化^[127]、高效过滤器^[128]等手段开展了研究,Yao等针对环境因素的研究发现臭氧、高温等因素可能降低病毒活性^[129]。这些研究为理解呼吸道传染病的传播过程与设计防控措施提供了参考。从研究趋势来看,早期研究以稳态场景居多,随着研究深入,考虑了呼吸气流的瞬态变化的研究逐渐丰富,但针对存在人员运动的动态场景的传染物质传播规律研究尚不充分,有待深入探索。

(三) 易感个体暴露与感染风险评估方法

对于呼吸道传染病传播的个体呼吸暴露与感染风险评估方法,学者在过去几十年对教室^[130-132]、医院^[133-135]、会议室^[136]、机舱^[137-139]等典型室内场景开展了系列研究,Wells-Riley模型、Dose-Response模型等方法得到了广泛使用^[140-143]。这些模型的具体原理虽有区别,但关键参数大多是易感者对传染物质的吸入/暴露剂量的评估^[144]。以Wells-Riley模型为例,1955年,Wells最早提出了“感染量子”(quantum of infection)的感染概念,用于计算空气传播的感染风险。“感染量子”是指导致一个易感个体感染的剂量,可以是一种或多种可附着在液滴上的病原体。1978年,Riley基于“感染量子”的概念,提出并发展了预测空气传播感染风险的Wells-Riley方程^[87],在后续研究中,学者考虑过滤、颗粒沉降、呼吸、非稳态条件等影响进行了多种修正。然而,在较长的时间里,采用Wells-Riley模型的研究大多局限于单个封闭空间,并假设传染物质在空间均匀分布,这与真实情况存在差异。2009年,Qian等考虑了传染物质空间分布的不均匀性,将Wells-Riley模型与CFD方法结合建立了预测呼吸道传染病空气传播感染风险空间分布的数学模型,可用于室内区域风险评估,并使用SARS流行期间在香港发生的一次大型暴发验证了模型有效性^[145]。在此基础上,Guo等引入了空间流量影响因子(spatial flow impact factor, SFIF),与Wells-Riley模型结合提出了一种获取感染概率空间分布的方法,可用于指导人员与净化器在室内布局的优化^[146]; Zhang等提出了一种基于稀释的空气感染风

险评估方法,进一步拓展了 Wells-Riley 模型的适用范围^[147]。总体而言,使用 Wells-Riley 模型进行呼吸道传染病的空气传播风险评估具有简单高效的优点,但由于其基于稳态的假设,在对动态场景的风险评估研究中需要结合非稳态计算结果进行修正,以实现更精确的区域风险与个体暴露风险的定量评估。在相关研究中,对易感个体吸入空气中占患者呼出的比例进行量化,结合 Wells-Riley 模型对易感者感染风险进行快速评估的方法表现出良好的应用前景^[148-150]。

综上所述,学者在过去几十年对呼吸道传染病的空气传播途径开展了大量研究,已基本阐明患者呼出的液滴等传染物质的典型粒径分布、静态场景的空气传播机理、易感个体暴露风险评估方法等问题,为呼吸道传染病的防控提供了科学依据。然而,现有研究也存在不足,包括尚未针对病原体在患者呼吸道的产生部位差异对呼出液滴粒径分布及室内风险的影响进行深入研究,缺乏对于动态场景呼吸道传染病传播机理、个体呼吸暴露、区域风险变化等问题的研究,还需进一步探索。

1.2.2 人员运动对流场与污染物扩散影响的实验研究

自 20 世纪 90 年代以来,学者针对人员运动行为对流场与污染物扩散的影响开展了一系列实验研究。依据实验类型,这些研究主要可以分为真人实验、全尺寸假人实验与小尺寸实验舱模型实验。从数量看,真人实验研究较少,使用轨道小车搭配假人实现模拟人员运动是常用方法。后者由于控制变量方便、可重复性强等优点,已得到广泛使用。部分研究基于流体力学的相似准则,采用缩小模型在受限空间中开展。

在人员运动对流场与污染物扩散的影响研究方面,涉及的行为包括局部运动(如手部活动)与全身运动(如行走),具体行为如移动、开门、开窗、就座、站起等。早期研究关注人类行走引起颗粒再悬浮机理较多,如 Micallef 等研究发现人员行走会促使室内壁面与衣服表面已沉积的颗粒重新悬浮,增加人员对可吸入颗粒物的暴露^[151]; Brohus 等基于实验结果提出了一种近似考虑人员走动的影响的评估手术室室污染物传播的方法^[152]。随着呼吸道传染病频发,针对人员运动对传染物质的扩散过程、室内区域风险及个体暴露影响的研究逐渐增多,如 Matsumoto 等在房间中使用加热圆柱体模拟移动的人体模型,揭示了运动速度对置换通风室内空气温度分布和通风效果的影响^[153]; Zhang 等研究了机舱中的乘客行为对空气质量和人员感染风险的影响,研究了调整座椅靠背、打开送风系统、呼吸三种乘客行为,结果

显示人员行为对周围微环境的流场和污染物分布影响很大^[154]；Liu 等研究了手术室中的人员行走,表明诱导气流会增加手术台上的病菌浓度,导致术后感染风险升高^[155]；Goldasteh 等研究了人员步态周期中的诱导气流及由此产生的颗粒再悬浮的特点^[156]；Benabed 等则定量研究了人员运动行为对室内颗粒再悬浮的促进作用,估算了不同粒径颗粒的排放率和再悬浮比例^[157]；林辉研究了人员活动对室内气流的影响,并通过量纲分析方法预测了人员活动对室内环境的影响程度^[158]；Zhang 等在客舱模型中开展实验,研究了物体运动对颗粒与气体污染物扩散的影响,并分析了风速和温度分布变化^[159]；Bhattacharya 等通过三维超声波风速仪研究了真实人员以 1 m/s 行走时两侧的诱导气流,发现该场景中人员运动诱导气流的单侧横向影响范围约为 0.6 m^[160]；Wang 等的研究显示移动人数的增加会提高颗粒物的再悬浮率,增加室内颗粒物浓度与个体暴露^[161]。总体来看,人员运动行为会促进室内的空气混合,促进气溶胶等颗粒物扩散,还可能降低颗粒的沉降与清除速度,其中全身运动如人员走动的影响是最为显著的一类。研究动态场景下呼吸道传染病的传播机理需要重点考虑人员运动对气流和传染物质扩散的影响。

随着机械工艺、材料科学、人体工学等领域知识与技术的发展,全尺寸呼吸暖体假人在过去几十年间得到了长足发展^[162],在人员安全与建筑环境领域得到了广泛应用,被用于开展人体热舒适/热损伤、室内气流、呼吸道传染病传播机理等研究^[163-167]。Han 等使用具有真实人体形态的假人进行运动实验,测量了假人移动与肢体摆动时身体各部位周围的瞬态气流,发现在通风不良的室内,无人移动时房间内风速小于 0.2 m/s,而一旦有人开始走动,气流速度会显著增加,对污染物扩散的影响也会增大；通过比较肢体摆动的影响,还发现躯干运动对流场的扰动比四肢摆动要显著许多^[163-164],因此后续多数研究采用平动模型简化近似人员的走动行为。Kalliomäki 等使用轨道小车搭配全尺寸假人研究了开门与跨房间移动行为,表明人员运动会显著促进污染物的扩散,但增加定向个性化通风可降低这一影响^[166-167]。Halvoňová 等在置换通风室研究了人员运动对通风效果与他人暴露的影响,表明运动人员与静止人员之间的交互距离可能是影响人员交互运动的扰动结果的关键参数^[168]。Ren 等研究了人员运动对室内流场的干扰及所需恢复时间,发现通风系统可以提升室内环境的稳定性,但对扰动在时间尺度的控制效果有限^[169]。Mahaki 等开展实验研究了人体运动对局部排气通风系统的捕获效率的影响,并与数值模拟结果进行了对

比^[170]。Zhao 等的实验研究表明,与稳态条件相比,人员运动会降低室内垂直温度梯度,改变局部环境^[171]。

此外,由于室内不同区域的颗粒物浓度分布存在差异,人的呼吸区域颗粒物浓度是决定个体吸入暴露和感染风险的关键,需要重点关注^[172]。人体与周围环境的温差产生的热羽流(也称对流边界层,convective boundary layer,CBL)会影响个体呼吸暴露^[173]。Licina 等使用真人和暖体假人开展了一系列实验^[174-176],发现 CBL 峰值速度通常在 0.2 m/s 左右。若忽略热羽流,在 20℃ 室内环境中评估个体呼吸暴露时可能出现 5%~20% 的误差^[177]。因此,研究个体呼吸暴露时应考虑人体热效应的影响。

基于流体力学中的相似准则,一些学者开展了小尺寸模型实验研究。Poussou 等用水箱中 1/10 比例的小尺寸客舱模型研究了污染物扩散特征,表明人员运动会将污染物携带到经过区域,但座位和乘客会阻碍污染物横向传播^[180]。Tao 等通过实验和数值方法探索运动物体周围气流与颗粒扩散特性,开发了一种烟雾可视化方法展示小尺度运动物体周围的尾流现象^[179],并使用真人形态 1/5 比例的模型,发现人员形态(胖瘦、腿部缝隙、头部曲线等)对尾流有明显影响。Luo 等使用 1/8 比例缩小假人模型研究了人员运动引起的尾流特点,发现人员周围竖直方向存在明显对流^[181]。尽管小尺寸实验具有节省空间与成本等优势,但总体而言,使用缩小模型复现实际场景的效果并不理想,与真实尺度的数据存在误差^[182]。因此,要精确研究真实尺度的人员运动气流,尤其是人员交互运动的瞬态气流特性及其对传染病传播机理的影响,需要开展更多的全尺寸实验,提供详细的结果作为参考;同时,为准确还原传染物质扩散规律,运动物体的形状应尽可能接近真实人体。表 1.1 总结了各位学者针对人员运动对室内气流与污染物传播影响实验的基本情况。

表 1.1 人员运动对室内气流与污染物传播影响的实验研究

学者	年份	运动类型	实验类型	研究场景
Poussou ^[180]	2010	移动	小尺寸假人	机舱
Halvoňová ^[168]	2010	走动	真人+假人	办公室
Goldasteh ^[156]	2014	走动	局部实验	洁净室
Han ^[42]	2014	移动、四肢摆动	假人	长走廊、房间
Tao ^[179]	2018	移动	小尺寸假人	普通房间
Luo ^[181]	2018	移动	小尺寸假人	长走廊

续表

学者	年份	运动类型	实验类型	研究场景
Kalliomäki ^[167]	2019	开门、移动	假人	开门跨房间
Benabed ^[157]	2020	走动	真人	洁净室
Bhattacharya ^[160]	2021	走动	真人	普通房间
Mahaki ^[178]	2021	移动	平板、圆柱	厨房
Wang ^[161]	2021	走动	真人	教室

实验测量人员运动诱导气流的常用手段主要包括：热球/热线风速仪、超声波风速仪、激光多普勒风速仪、烟雾可视化、粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 等。这些方法各有优劣, 需要根据研究问题的尺度、场景的封闭性等因素综合考虑^[183]。热球/热线风速仪由于操作简单、环境适应性强、响应速度快等优点, 至今仍被广泛使用。非侵入式方法如 PIV 测量已被引入人员运动诱导气流的测量中, 但有诸多限制, 如需要加入示踪粒子、激光易受到物体表面反射干扰影响结果、测量范围有限等, 通常用于小尺寸实验^[184], 目前采用 PIV 方法在全尺寸实验舱中测量人员运动诱导气流还存在较大困难。在人员运动对污染物扩散影响的实验研究中, 示踪气体发生器、浓度传感器、气溶胶发生器、气溶胶粒径谱仪等是常用设备与技术手段。

综上所述, 在过去二十多年里, 学者详细研究了人员运动对气流的影响, 详见图 1.3。然而, 现有研究多聚焦人员运动诱导气流与尾迹测量, 较少考虑人员运动与他人呼吸气流的交互作用, 缺乏人员交互运动对污染物尤其是呼吸道传染物质的传播和对人员呼吸暴露的影响研究。实际上, 在办公室、工厂、火车、机舱等室内场景, 常发生人员交互运动现象。该过程气流变化明显且迅速, 会影响污染物的传播规律, 特别是在人员与患者发生交互运动时, 交互气流可能促进患者呼出的传染物质的远距离传播, 然而针对此类场景的瞬态气流特性与呼吸道传染病的传播规律尚无深入研究。探究人员交互运动的气流特性, 有助于从根本上阐明动态场景下呼吸道传染病的传播规律, 为呼吸道传染病的防控提供科学依据。此外, 目前尚未见到针对多人交互运动场景的气流特性及影响的实验研究, 值得进一步探索。

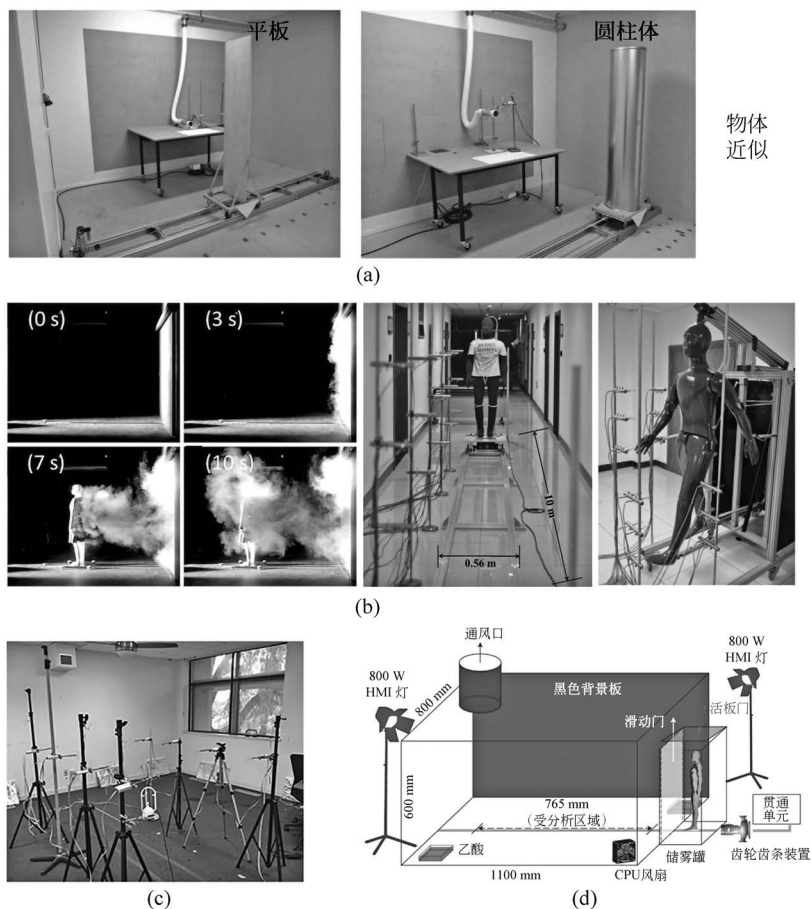


图 1.3 人员运动对流场影响的实验研究

(a) 平板、圆柱体运动^[178]; (b) 全尺寸假人移动与肢体摆动^[42,166];
 (c) 真实人员走动^[160]; (d) 小尺寸人体模型运动^[179]

1.2.3 人员运动对流场与污染物扩散影响的数值模拟研究

由于实验场地限制、测量仪器昂贵等原因,实验手段通常难以全面研究所有场景与变量。对于侵入式测量方法,仪器的存在还会干扰流场与污染物扩散过程,影响测量结果精度。因此,CFD 方法在 20 世纪 70 年代被引入室内气流研究^[185],在此后几十年间得到了广泛使用,相关模拟方法与结论也被用于研究呼吸道传染病的传播规律和个体呼吸暴露风险评估

中^[27,186-188]。随着计算机性能的提升,近年来许多学者使用 CFD 方法开展了人员运动行为对流场与呼吸道传染病传播影响的研究,取得了一些进展,基本信息详见表 1.2。

表 1.2 人员运动行为对流场与呼吸道传染病传播影响的数值模拟研究

学者	年份	湍流模型	运动速度/(m/s)	运动人数	研究场景
Shih ^[189]	2007	Standard $k-\epsilon$	/	单人	隔离病房
Choi ^[190]	2008	LES	0.5、1.0、1.5	单人	医院病房
Mazumdar ^[182]	2011	RNG $k-\epsilon$	1.0	单人	机舱
Choi ^[191]	2012	LES	0.75、1.0、1.25	5 人依次	跨房间
Han ^[192]	2014	RNG $k-\epsilon$	0.5、1.0	单人	机舱
Hang ^[43]	2014	RNG $k-\epsilon$	0.11~1.09	单人	医院病房
Tao ^[193]	2017	RNG $k-\epsilon$	0.8、1.6	单人	普通房间
Luo ^[184]	2018	RNG $k-\epsilon$ 与 LES	0.5	单人	长走廊
Liu ^[155]	2020	Realizable $k-\epsilon$	0.25、0.5、1.0	单人	手术室
Blocken ^[194]	2020	LES	1.11、4.0	2 人	风洞
Zhao ^[195]	2022	Realizable $k-\epsilon$	0.8	多人	航站楼
Liu ^[196]	2022	RNG $k-\epsilon$	0.5	1~6 人	厢式电梯
Takii ^[197]	2022	/	/	5 人/10 人	自动扶梯
Tan ^[198]	2023	RNG $k-\epsilon$	0.25、0.5、1.0	单人	医院病房

与实验研究相比,CFD 数值模拟方法通过构建典型室内场景,详细研究各类参数的影响,具有成本低、可重复性强、可视化信息细节丰富等优点^[199-200],可为个体暴露与区域风险评估和设计防控措施提供参考。在 CFD 方法中,数值模型与湍流模型方法是影响 CFD 计算准确性的关键^[201-203]。

为降低计算成本,CFD 数值模型通常会进行简化。早期的数值人体模型通常采用简化的圆柱体或棱柱组合近似替代^[190,204]。但研究显示,人体模型的简化如忽略头部曲线特征与腿部间隙等因素会影响计算结果的准确性。因此,随着计算机性能的提高与激光三维扫描成像等技术的发展,使用具有真实人体形态的数值人体模型开展 CFD 研究逐渐成为数值模拟研究的主流^[155,181,205],以更好地模拟还原真实人体运动的影响。从结果来看,运动物体引起的室内诱导气流通常随运动强度(如速度)的增加而增强^[164,198],人员的尾流峰值速度约为运动速度的 1.8 倍^[204]。Hang 等研究了病房中人员行走对室内传染物质分布的影响^[43],发现在行走停止后,传

染物质的空间浓度分布受到的影响还将持续 30 s 以上。Han 等定量研究了机舱中的人员运动对液滴传播和区域沉积分布的影响^[192],结果表明机舱中的运动人员通常面临较高的感染风险,且运动行为影响了室内风险分布。Choi 等研究了 5 人依次步行通过一扇门的行为,发现每个步行事件都会将示踪材料带入洁净室^[191],且运动人员的相对位置和运动方式的变化会改变其对污染物扩散规律的影响。Luo 等研究了办公室中的人员运动行为对污染物浓度与个体暴露的影响,发现人员走动会促进室内污染物在不同高度的扩散与混合,增加个体呼吸暴露风险^[188]。值得注意的是,关于人员运动对室内颗粒物浓度与扩散的影响,研究人员有不同的观点:Wang 等认为人员行走可能会减少悬浮液滴总数,且显著性随速度增加,原因是快速行走的人体产生的诱导气流更强,将颗粒推向排气格栅的速度更快,因此较高的运动速度有利于减少呼吸区的污染物暴露^[206];但 Cao 等的研究显示,更高的行走速度可能延长悬浮气溶胶的浓度衰减时间^[207],增加室内人员的呼吸暴露风险。总体而言,这些差异可能与人员运动模式、场景布置、通风差异等原因有关,需要构建更接近真实人体形态的数值模型开展精细化研究。这些研究结果也表明,人员运动对污染物扩散过程的影响很可能存在较大的空间差异,针对特定区域,如人员交互运动的局部空间的影响,也需要具体深入研究。

选择合适的湍流模型是保障数值模拟计算结果准确性的关键因素之一。目前较广泛使用的有雷诺平均(Reynolds average navier-stokes, RANS)方法,如重整化群 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型及大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法。Poussou 等通过小尺度流场实验数据与 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型的结果进行对比,认为 RANS 方法基本可以模拟人员运动引起的尾迹变化^[180],并具有较高的计算效率,因此尽管该方法在对瞬态湍流细节的还原上较 LES 方法有不足^[190],但仍在人员运动的数值模拟研究中得到了广泛应用。数值模拟方法的有效性需要与实验数据进行对照验证。在过去二十几年间,一些学者开展了相关研究,如 Chen 等通过实验结果验证了湍流模型计算室内气流的方法的有效性^[203]; Blocken 等分析了 RANS 方法与 LES 方法在模拟室内气流与污染物传播时的优劣,并给出了相应的建议^[208]。一些学者设计了具体场景,通过比较实验与数值模拟的结果,为选取湍流模型提供了参考,如 Luo 等使用 PIV 实验研究运动人员的尾流特性,与数值模拟方法进行对比,发现 LES 方法可以较好地还原实验结果^[184]。从现有研究来看,LES 方法在开展瞬态模拟与还原湍流细节方面表现较好,RNG $k-\epsilon$ 湍流模型在室内稳态流场的计

算及非稳态问题的计算中的综合性能平衡较好,二者的选择可以结合实际场景,根据计算需要选择使用。

自 COVID-19 大流行以来,针对人员运动对呼吸道传染物质传播的影响研究得到了更多关注,如图 1.4 所示。Blocken 等采用 LES 方法模拟了跑步人员呼出的病毒的扩散,发现许多气溶胶由于惯性较小并未继续向前传播,而是随跑步人员尾迹向后传播,对后面的人造成风险^[194]。Chen 等研究了头部运动对近距离对话场景中的人员瞬态暴露风险的影响,发现当患者的头部保持不动时,易感者的暴露水平相对较高^[209]。Li 等模拟了行走的患者咳嗽产生的液滴扩散情况,发现液滴倾向于分布在患者腰部以下,意味着儿童的感染风险可能高于成人,同时该研究表明应针对不同环境制定不同的安全距离指南^[210]。在上述研究的基础上,近几年有学者开展多人交互运动的数值模拟研究,如 Zhao 等研究了航站楼的多人并排定向行走对气流与污染物扩散的影响^[195]; Liu 等模拟了人员乘坐厢式客梯在进出客梯时对患者呼出液滴扩散的影响,发现传染物质对尾流有明显的跟随^[196]。这些结果也表明,多人的交互运动可能会促进远距离空气传播,且影响比单人运动更大。

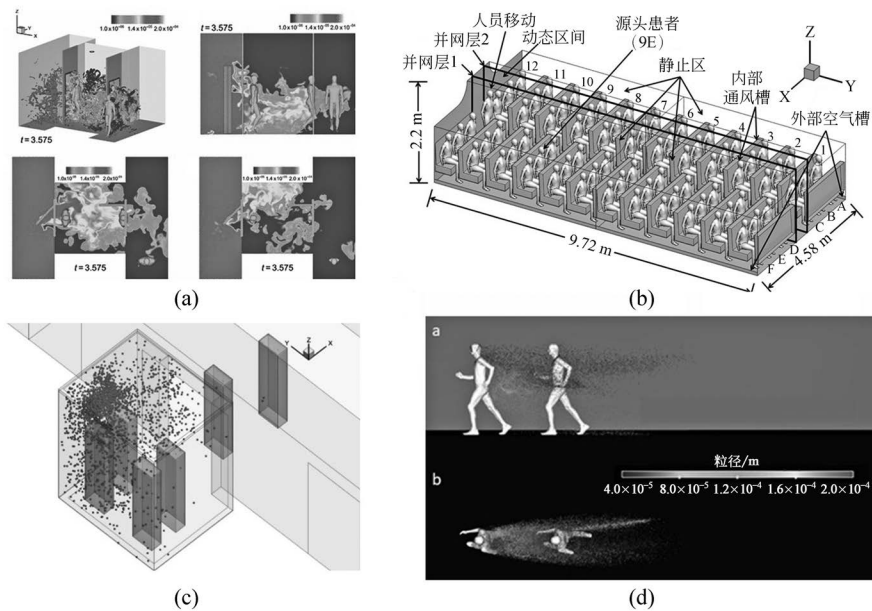


图 1.4 人员运动对呼吸道传染病传播影响的 CFD 模拟

(a) 跨房间走动^[191]; (b) 机舱人员移动^[192]; (c) 进出客梯^[196]; (d) 跑步交互^[194]

1.2.4 研究现状总结

国内外学者通过对呼吸道传染病的空气传播机理、人员运动对室内污染物扩散的影响规律等问题开展实验与数值模拟研究,取得了一些成果。在空气传播机理方面,学者通过研究已基本阐明了静态场景呼吸道传染病空气传播途径的主要特点、个体呼吸暴露与风险评估方法等问题。在人员运动的影响方面,学者重点研究了人员运动诱导气流特征、人员运动对室内流场和污染物浓度变化的影响等基本问题,并初步建立了适用于非稳态气流研究的实验与 CFD 方法。相关研究成果应用于指导室内通风设计、污染物控制、传染病防控等领域。

研究表明,人员运动会显著影响呼吸道传染物质的扩散,进而改变呼吸道传染病的传播风险。在人员运动对呼吸道传染病传播的影响研究中,根据运动干扰所处时间维度,影响可分为两类:①已悬浮在空气中尚未沉降也未被吸入的传染物质,受到人员运动的影响改变扩散规律,这主要是小粒径气溶胶;②患者刚呼出的传染物质受到附近的人员与患者的交互运动影响而改变扩散规律,其中既可能有中小粒径气溶胶,也可能有大粒径的飞沫。上述两类影响都会改变呼吸道传染病在室内的传播规律,影响个体与区域风险。然而,现有的研究大多仅针对第一类影响开展,而第二类影响由于气流、气溶胶浓度变化迅速,对测量仪器要求高等原因,尚未得到详细研究。本书聚焦的人员交互运动场景,正是同时考虑了两类影响的典型动态场景。

近年来相关研究呈现出以下趋势:①研究模式向非稳态、局部交互环境转变。在时间尺度上,研究模式由稳态研究转变为更复杂的非稳态研究与瞬态研究,更加关注环境中的人员运动等瞬态过程的气流特性、颗粒浓度、个体呼吸暴露等关键要素的精确评估;在空间尺度上,由关注整个室内空间的流场特征转变为聚焦人体周围微环境(如呼吸区域)、人员交互的局部空间的气流特性与污染物传播规律。②定量研究趋于个性化、精细化。随着 CT、激光扫描成像等技术的发展与计算机性能的提升,构建具有真实人体形态与呼吸边界的数值人体模型并开展 CFD 数值模拟已成为常用研究手段,对个体呼吸暴露和感染风险的评估也从区域整体风险评估转变为个体暴露与风险的精确量化评估。

现有研究的不足主要有以下三点。

1. 动态场景的呼吸道传染病空气传播机理的研究不足

已有的针对呼吸道传染病空气传播机理的研究大多基于静态场景,相关结论未考虑人员运动的影响。室内场景普遍存在的人员交互运动会改变传染物质的扩散规律、个体暴露与区域风险分布,但尚未见到详细研究。此外,病原体在患者呼吸道内的复制部位差异可能影响患者呼出的传染物质的粒径分布,但现有研究很少考虑。应综合考虑上述因素开展系统研究,阐明动态场景中呼吸道传染病传播机理。

2. 缺乏人员交互运动气流特性与对个体暴露和区域风险影响的研究

已有研究重点关注了人员运动的诱导气流形态及其对污染物扩散的整体影响,但未见针对人员交互运动场景的局部瞬态气流、个体瞬态呼吸暴露特性的详细研究,一些关键问题待澄清,如人员交互运动气流特性、人员交互运动对个体呼吸暴露和区域风险的影响等。弄清上述基本问题,有助于从根本上理解动态场景中呼吸道传染病的传播机理,指导开展呼吸道传染病的风险评估与制定防控策略。

3. 多人交互运动对呼吸道传染病传播的影响与动态风险评估研究不足

在多人室内场所如火车站候车室、机场航站楼、地铁站台等区域,常存在多人交互运动,可能导致复杂流场。然而目前尚未见到针对多人交互运动的气流特性及其对呼吸道传染病传播影响的实验研究,少数几例 CFD 模拟均采用简化人体模型,精度有限。为精确开展人员密集场所的呼吸道传染病传播动态风险评估,急需阐明多人交互运动气流特性与其对呼吸道传染病传播的影响,并构建区域动态风险评估方法开展研究,为制定呼吸道传染病的防控策略提供技术支撑。

1.3 研究内容与技术路线

本书聚焦动态场景呼吸道传染病空气传播机理,围绕人员交互运动气流特性、对呼吸道传染病传播的影响规律等科学问题,综合采用全尺寸实验与数值模拟方法,深入探究人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响。通过量化瞬态流场、个体呼吸暴露与室内风险的变化规律,为明晰动态场景中呼吸道传染病传播机理、开展风险评估和制定防控策略提供科学依据。

本书各章研究内容与逻辑关系如图 1.5 所示。首先,构建人员交互运动的全尺寸实验平台与多姿态三维数值呼吸人体模型,建立人员交互运动实验与数值模拟方法,作为后续研究的基础。随后,研究传染物质从患者呼吸道不同部位释放的规律,分别开展近距离、远距离空气传播机理研究,建立风险评估方法,为动态场景空气传播研究提供基础。其次,开展一系列气溶胶实验与流场实验,探究人员交互运动气流特性及其对传染物质扩散的影响,分析流场、个体呼吸暴露、室内区域风险的变化规律。同时,采用 CFD 动网格方法详细研究不同交互距离、人员姿态、运动速度、通风条件下的人员交互运动气流特性与传染物质扩散轨迹、浓度时空分布规律,分析其机理。最后,构建多人室内场景,研究多人交互运动引起的气流特性及其对呼吸道传染病传播的影响,综合考虑交互运动人数、人员位置分布、速度、通风等因素,为人员密集场所的动态风险评估与呼吸道传染病防控提供科学依据。

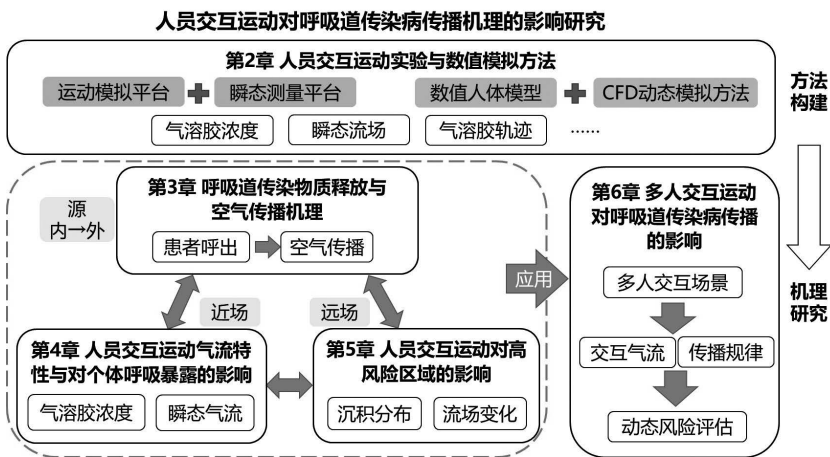


图 1.5 本书主要研究内容与逻辑关系

1.4 本书结构安排

本书共分为 7 章,第 1 章为引言,第 2~6 章为主体研究内容,第 7 章为总结与展望。第 2~6 章的具体安排如下:

1. 人员交互运动实验与数值模拟方法研究

第2章,介绍本书的人员交互运动实验方法与数值模拟方法。构建人员交互运动实验平台,使用轨道小车搭配真实人体形态的假人与暖体呼吸假人实现人员交互运动,介绍实验平台搭建、主要设备仪器、气溶胶实验与流场实验的技术路线;构建具有真实人体形态与呼吸边界的多姿态数值人体模型,介绍人员交互运动的数值模拟实现方法,作为后续章节开展数值模拟研究的基础。

本章建立的人员交互运动实验平台将应用于人员交互运动气流对个体呼吸暴露的影响研究(第4章)、人员交互运动对室内流场与区域风险的影响研究(第5章)。数值模拟方法将运用于呼吸道传染物质释放与空气传播机理研究(第3章)、人员交互运动气流及其对传染物质扩散和室内风险的影响研究(第4章)、多人交互运动对呼吸道传染病传播的影响研究(第6章)。

2. 呼吸道传染物质释放与空气传播机理研究

第3章,针对呼吸道传染物质的传染源特性与空气传播机理开展研究。针对传染源特性,研究传染物质从患者呼吸道的呼出过程,采用具有真实呼吸道的三维数值人体模型,量化病原体从患者呼吸道不同部位呼出与扩散特性差异。针对呼吸道传染病的空气传播机理,设计典型近距离暴露场景研究近距离空气传播机理,结合新冠疫情早期发生在密闭空间中的远距离感染案例,研究影响空气传播的主要因素,并建立风险评估方法定量研究多人室内空间的空气传播风险。本章的结论将作为后续章节动态场景呼吸道传染病空气传播机理研究的基础。

3. 人员交互运动气流特性与对个体暴露的影响研究

第4章,综合采用全尺寸实验与数值模拟方法,研究人员交互运动气流特性、人员交互运动对个体呼吸暴露和传染物质扩散过程的影响。实验方面,使用第2章构建的人员交互运动实验平台,用快速粒径谱仪采集记录个体呼吸区域气溶胶浓度瞬态变化,量化人员交互运动对个体呼吸暴露的瞬态与持续影响差异。数值模拟方面,使用三维数值呼吸人体模型,采用CFD动网格方法与LES方法开展人员交互运动气流研究,深入分析交互距离、运动速度、人员姿态、通风条件等因素对人员交互运动气流特性的影

响；提出个体暴露与区域风险评估方法，定量研究人员交互运动对室内风险的影响。本章的结果将为第5章、第6章提供基础参考。

4. 人员交互运动对高风险区域的影响研究

患者呼出的气溶胶受人员交互运动的影响，可能导致区域风险变化。第5章通过开展系列气溶胶实验与流场实验，研究人员交互运动对患者呼出的气溶胶的高风险区域的影响。使用第2章的人员交互运动实验平台，通过荧光沉积方法研究人员交互运动对患者呼出气溶胶导致的室内高风险区域的影响，综合考虑运动方向、交互距离、交互角度、通风条件等多种因素的影响，并量化人员交互运动场景下的室内流场变化规律。本章是第4章的拓展与深化，并为第6章提供参考。

5. 多人交互运动对呼吸道传染病传播的影响研究

第6章，基于第3~5章的研究结果，针对普遍存在的多人交互运动现象，使用CFD方法开展多人交互运动的数值模拟，并建立区域动态风险评估方法；综合考虑交互运动人数、位置分布、运动速度、液滴粒径、通风条件等因素，探究多人交互运动的气流特征，并开展动态风险评估。本章作为本书研究方法与前文结论的综合应用，旨在为多人交互的动态空间的呼吸道传染病传播机理与区域动态风险评估提供技术支撑，为呼吸道传染病的防控策略制定提供科学依据。

第 2 章 人员交互运动实验 与数值模拟方法研究

2.1 本章引论

本书以阐明人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响规律为目标,充分结合实验研究的场景真实性强、测量精度高等优点,以及数值模拟的可视化信息丰富、成本低等优势,构建了一项综合性的人员交互运动研究方法,以解决动态场景呼吸道传染病传播机理研究的技术和工具难题,如图 2.1 所示。

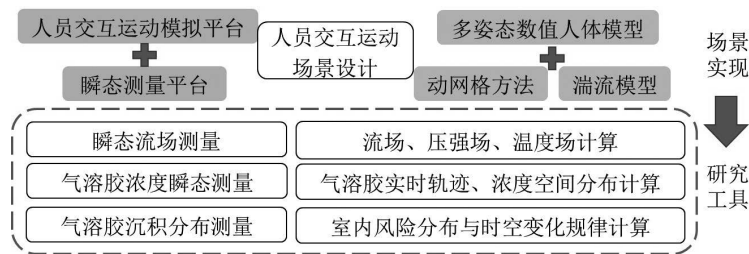


图 2.1 人员交互运动研究方法与工具

本书构建的研究方法可开展多种人员交互运动场景的瞬态流场测量、气溶胶浓度瞬态波动与区域沉积分布测量,获取不同姿态、交互距离、运动速度、通风条件下的流场、压强场、温度场、气溶胶实时轨迹、气溶胶浓度空间分布等重要信息。在此基础上,本书还建立了人员交互运动对呼吸道传染病室内传播风险时空分布影响的研究方法和区域动态风险评估方法,为全面开展人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响研究提供了技术支撑。

在技术路线上,构建人员交互运动实验平台,使用轨道小车搭配具有真实人体形态的全尺寸假人来模拟人员运动,该方法的可靠性已得到广泛验证,且具有控制变量方便、可重复性强等优点,搭配气溶胶和流场测量仪器,

可以实现人员交互运动场景的瞬态测量。构建数值人体模型、建立人员运动的 CFD 动网格方法是实现人员交互运动模拟的关键,同时还需要选择合适的湍流模型以保障计算准确性。人体模型的形状如腿部间隙、头部曲线等细节会影响气流形态与对污染物扩散的影响规律。本书构建具有真实人体形态与呼吸边界的多姿态数值人体模型,应用于人员交互运动的数值模拟研究。

本章具体介绍人员交互运动研究方法,包括实验平台(运动模拟平台、瞬态测量平台)的构建、主要设备与技术路线、多姿态数值人体模型的构建、人员交互运动的动网格方法、湍流模型,为全面开展人员交互运动对呼吸道传染病传播机理的影响研究提供技术支撑,将分别应用于本书第 3~6 章的研究。

2.2 人员交互运动实验平台搭建与实验设计

2.2.1 实验平台与设备仪器

人员交互运动实验平台搭建于安徽省合肥市的清华大学合肥公共安全研究院的恒温恒湿实验舱中,如图 2.2 所示。实验舱的尺寸为 $6.4\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$,体积为 96 m^3 ,中间布置有一个由直线段和半圆组成的 16.5 m 轨道。实验舱的通风由顶部风扇控制,管径为 0.2 m 。在开展人员交互运动实验期间舱门关闭,新鲜空气从实验舱左侧的 6 个直径为 0.1 m 的圆孔进入。实验舱的温度、湿度可控制保持恒定,误差分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 与 0.1% 。

本书构建的人员交互运动实验平台包括两个部分,分别是运动模拟平台与瞬态测量平台。运动模拟平台的主体部分包括坐姿暖体呼吸假人(sitting thermal breathing manikin, STBM, 蓝色)、站姿移动假人(moving manikin, MM, 橙色)与轨道小车,如图 2.2(b)所示。两个假人的尺寸均与真实人体大小相近。轨道小车底部安装有电机,可以控制小车以恒定速度运动。通过轨道小车带动 MM 从 STBM 旁边经过,实现人员交互运动过程。STBM 与真人大小相同,高 1.7 m ,肩宽 0.58 m ,背厚 0.29 m ,根据人体生理结构分为 20 个部分,外壳主要由环氧金属材料制成,内置加热装置、温度和热流传感器,皮肤温度的控制和测量精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ^[21]。STBM 放置在轮椅上,总高度为 1.35 m ,呼吸区高度为 $1.20\sim 1.25\text{ m}$ 。MM 高度为 1.72 m ,固定在轨道小车中间,可跟随小车沿着轨道运动。在实验期间,小车的启动和停止由实验舱外的遥控远程控制,以减少对实验结果的干扰。

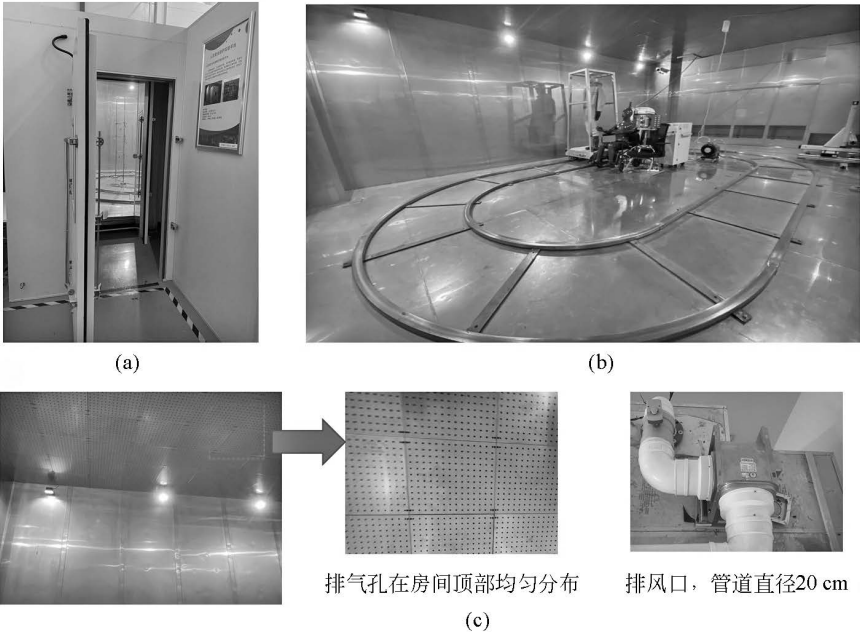


图 2.2 人员交互运动实验平台

(a) 实验舱；(b) 实验平台；(c) 通风系统

对于瞬态测量平台,本书的实验主要有两类,分别是气溶胶实验与流场实验。对于气溶胶实验,主要仪器包括呼吸机、气溶胶发生器、雾化器、微米气溶胶粒径谱仪、纳米气溶胶粒径谱仪等。对于流场实验,主要仪器包括多点风速仪、风速探头等。各设备型号及主要参数见表 2.1,主要设备外观如图 2.3 所示。在各实验过程中,实验仪器的具体参数设置将在后续相关章节的实验方法部分作进一步介绍。

表 2.1 实验设备信息

设备名称	主要参数
坐姿暖体呼吸假人 STBM	美国 Measurement Technology Northwest Inc., Newton 坐在轮椅上,地面至头顶高 1.35 m,呼吸区高 1.20~1.25 m
移动假人 MM	身高 1.72 m 的站姿人体模型
轨道小车	尺寸为 0.5 m×0.5 m×0.3 m,可沿轨道运动
轨道	宽 0.5 m,由两段直线与半圆组成,长 16.5 m(±0.1 m)

续表

设备名称	主要参数
气溶胶粒径谱仪 DMS500	英国 Cambustion Inc. ,测量粒径范围为 5~1000 nm,最高采样频率为 10 Hz,流量为 8 L/min
气溶胶粒径谱仪 GRIMM11-A	美国 GRIMM Inc. ,测量粒径范围为 0. 25~32 μm,最高采样频率为 $\frac{1}{6}$ Hz,流量为 1. 2 L/min
气溶胶发生器 GRIMM7811	美国 GRIMM Inc. ,可产生粒径为 5~200 nm 的 NaCl 气溶胶,粒径分布近似对数正态分布,峰值为 20~50 nm
呼吸机 S1100	南京舒普适达医疗器械公司,呼吸流量可设为 7. 5 L/min (±0. 15 L/min),正弦呼吸,频率为 15 次/min(±0. 1/min)
雾化器 403H	江苏鱼跃医疗设备股份有限公司,流量 10 L/min
热球风速探头	日本 Kanomax Inc. ,型号 0965-03,量程为 0. 10~4. 99 m/s,分辨率为 0. 01 m/s,采样频率为 10 Hz
多点风速仪	Kanomax Inc. ,型号 6242-1550,可 32 通道同步测量

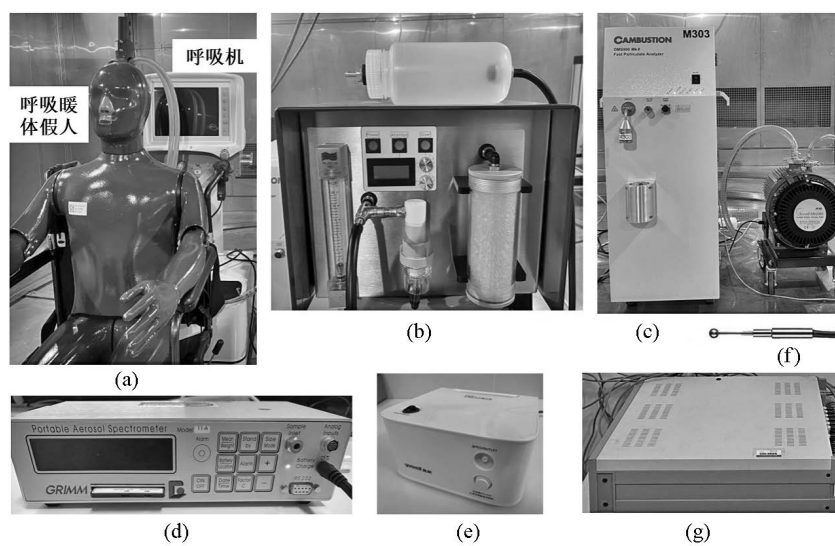


图 2.3 主要实验设备外观

(a) 呼吸机 S1100; (b) 气溶胶发生器 GRIMM7811; (c) 纳米粒径谱仪 DMS500;
(d) 微米粒径谱仪 GRIMM11-A; (e) 雾化器 403H; (f) 热球风速探头; (g) 多点风速仪

2.2.2 实验设计与技术路线

本书的实验目的是研究人员交互运动的气流特性和人员交互运动对呼吸道传染病传播的影响机理。基于上述目的,分别设计了针对瞬态流场、瞬态气溶胶浓度、区域气溶胶沉积测量的系列实验,研究内容包括 4 个方面:①瞬态交互气流;②个体呼吸暴露瞬态变化;③室内流场瞬态变化;④室内区域风险变化与高风险区域评估。人员交互运动实验思路与技术路线如图 2.4 所示。

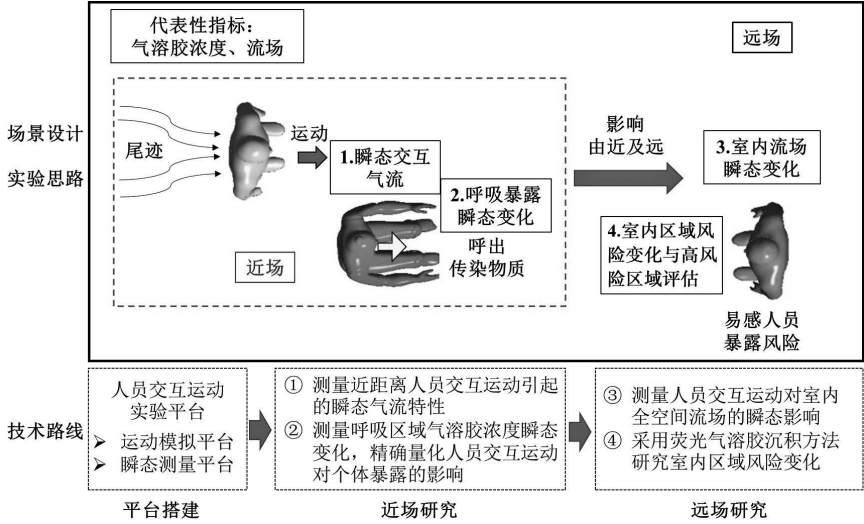


图 2.4 人员交互运动实验设计与技术路线

利用人员交互运动实验平台(运动模拟平台与瞬态测量平台),首先研究近距离人员交互运动场景中的瞬态气流特性,并测量呼吸区域的气溶胶浓度变化,以精确量化人员交互运动对个体呼吸暴露的影响规律;考虑到交互运动的影响由近及远,进一步开展人员交互运动对室内全空间流场的瞬态影响研究,并采用荧光气溶胶沉积方法研究室内区域风险变化。

在研究覆盖范围与路径选择上,本研究由近及远,具有连贯性:从近场的人员交互运动瞬态气流特性与个体呼吸暴露变化,到远场的室内全流场变化与区域风险评估,深入探究人员交互运动对呼吸道传染病空气传播机理的影响。

与现有研究相比,本实验平台的创新点与优势如下:①动态性:打破

了已有的针对呼吸道传染病空气传播机理的实验研究大多基于静态场景的局限,加入人员交互运动过程,深入探究动态场景呼吸道传染病传播机理与个体暴露的变化规律;②典型性:提炼出现实中常见的、具有代表性的人员交互运动场景,使用具有真实人体形态的假人模型,能较好地模拟真实的人员交互运动,并综合考虑了呼吸、人体热效应、通风等因素,深入研究人员交互运动引起的室内流场变化规律,明晰人员交互运动对呼吸道传染病传播的影响;③普适性:本书实验研究成果对于阐明各类呼吸道传染病在动态场景的空气传播机理具有普遍参考价值。在本书研究基础上,实验平台还可通过修改场景布局等条件,构建多类研究场景,深入全面地开展动态场景呼吸道传染病空气传播机理研究。

2.3 人员交互运动数值模拟方法

随着计算机性能的发展,以 CFD 方法为代表的数值模拟方法因具有成本低、耗时短、可重复性强、信息丰富等优点,已被广泛应用于室内气流与呼吸道传染病传播的研究。在人员交互运动的研究中,构建数值人体模型是开展 CFD 计算的重要基础,人员交互运动的实现、选择合适的湍流模型是得到准确的人员交互运动数值模拟结果的关键。因此,本节主要包括:①多姿态三维数值人体模型构建;②实现人员交互运动的 CFD 动网格方法;③流场计算的湍流模型与方法。

2.3.1 多姿态三维数值人体模型构建

人体形态会影响人员运动的气流特征与对传染物质扩散的影响规律,因此,本书首先构建具有真实人体形态与呼吸边界的三维数值人体模型,作为后续计算的基础。数值人体模型的构建主要分为两个部分:一是获取真实人体躯干几何结构,二是人体面部与呼吸边界处理(口鼻边界、呼吸道)。

数值模型的躯干几何结构的获取步骤如下:使用激光三维扫描仪对固定在不同姿态的全尺寸暖体假人 Newton 进行扫描,通过配套的软件进行后处理,分别得到站姿、坐姿数值人体模型,能够较好地展示人体模型的复杂外形结构,包括面部五官与肢体细节等。在此基础上,构建含呼吸边界的三维数值人体模型。本书根据研究需要构建了三类数值人体模型:①站姿人体模型;②坐姿人体模型;③运动人体模型。共 4 个,分别编号 P01~P04,如图 2.5 所示。

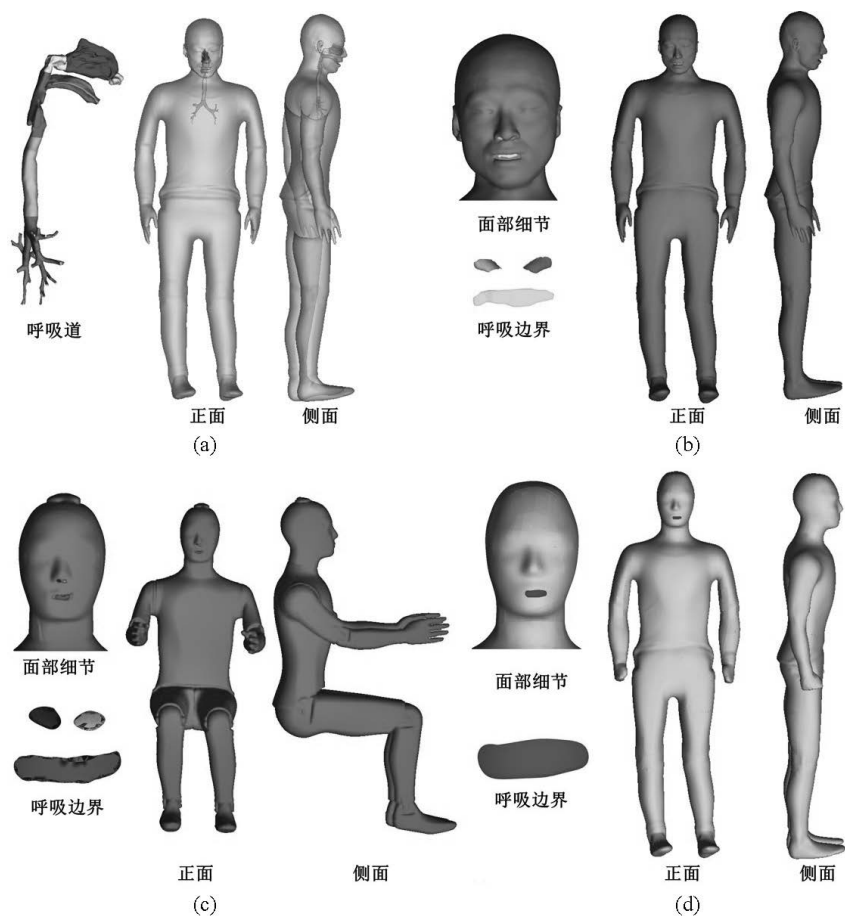


图 2.5 多姿态三维数值人体模型

(a) P01 模型; (b) P02 模型; (c) P03 模型; (d) P04 模型

人体模型高度均为 1.7 m,躯干几何结构均基于 Newton 假人,呼吸边界面积则根据运动状态分别设置,其中口面积为典型的 $0.618 \sim 7.1 \text{ cm}^2$ [212]。站姿人体模型旋转 90° 即可得到卧姿人体模型,后续还可应用于医院病房、手术室等场景的数值模拟研究。4 个人体模型的具体情况如下。

(1) 站姿人体模型 P01: 站姿,具有面部细节与真实呼吸道结构,可模拟口/鼻呼吸,口面积为 1.68 cm^2 。呼吸道部分由上至下依次为鼻腔、口腔、咽、喉、气管与支气管 1~5 级(G1~G5) [213]。

(2) 站姿人体模型 P02: 站姿, 躯干结构、面部、口鼻边界与 P01 相同, 无呼吸道。

(3) 坐姿人体模型 P03: 坐姿, 简化口鼻边界, 无呼吸道, 口面积为 1.68 cm^2 。

(4) 运动人体模型 P04: 站姿, 简化口鼻边界, 无呼吸道, 考虑到人员运动时口部张开面积较大, 口面积设置为 4.73 cm^2 。

开展 CFD 计算时, 使用 ANSYS ICEM 软件对数值人体模型进行处理, 用于数值场景构建与网格生成, 使用 ANSYS Fluent 软件设置边界条件并开展数值计算。

2.3.2 人员交互运动的 CFD 动网格方法

在人员交互运动的数值模拟过程中, 模拟人员运动及其对气流的影响是一个技术难点。CFD 中的动网格模型(dynamic mesh model)采用定义边界或网格节点运动的方式模拟物体的运动, 可用来模拟由于计算域边界运动导致域形状随时间变化的流动^[214-215]。该方法的可靠性已得到实验的广泛验证, 具有较好的适应性^[155,180,184,216]。

动网格方法的核心技术是处理物体运动导致的网格运动的方式, 即网格更新方法。动网格方法中常用的网格更新方法主要有光顺方法(smoothing)、网格重构方法(remeshing)与动态分层方法(layering)。本书构建的三维数值人体模型表面细节丰富, 生成的网格结构复杂, 因此, 综合采用光顺方法与网格重构方法进行动网格模拟。

光顺方法是基础的动网格方法, 主要适用于小变形且在变形过程中网格节点拓扑关系不发生变化的场景。在本书使用的 ANSYS Fluent 软件中提供了三种光顺方法: 弹簧近似光顺(spring-based)、扩散光顺(diffusion)、线性弹性固体(linearly elastic solid)。本书的研究选用弹簧近似光顺方法, 此方法的基本思想为将节点之间视作理想弹簧, 通过计算弹簧力的平衡更新节点位置。弹簧力 $\vec{F}_i$ 的计算公式为:

$$\vec{F}_i = \sum_j^{n_i} k_{ij} (\Delta \vec{x}_i - \Delta \vec{x}_j) \quad (2-1)$$

式中, $\Delta \vec{x}_i$ 和 $\Delta \vec{x}_j$ 为节点 i 及相邻节点 j 的位移; n_i 为与节点 i 相连的节点数量; k_{ij} 为弹簧刚度, 定义为:

$$k_{ij} = \frac{k_{\text{fac}}}{\sqrt{|\vec{x}_i - \vec{x}_j|}} \quad (2-2)$$

式中, k_{fac} 为可设置的 spring constant factor 参数。

当节点处于平衡状态时,作用在节点上的弹簧力应为 0,则有:

$$\sum_j^{n_i} k_{ij} (\vec{\Delta x}_i - \vec{\Delta x}_j) = 0 \quad (2-3)$$

据此得到位置计算的迭代关系式:

$$\vec{\Delta x}_i^{m+1} = \frac{\sum_j^{n_i} k_{ij} \vec{\Delta x}_j^m}{\sum_j^{n_i} k_{ij}} \quad (2-4)$$

弹簧光顺方法在计算时需要设置的主要参数有 3 项: ①弹簧刚度系数 (spring constant factor), 取值范围为 0~1, 取值越大, 影响范围越广, 在本书的计算中设置为 0.7; ②收敛精度 (convergence tolerance), 在本书的计算中设置为 0.001; ③迭代次数 (number of iterations), 即设置迭代方程求解的迭代次数, 在本书计算中初始值设置为 20, 在计算过程中根据收敛情况调整。

网格重构方法是一种能解决任意运动的动网格方法, 其基本原理是在计算过程中持续监测网格质量, 标记质量低于要求的网格并进行重新划分。在实际应用中, 网格重构方法主要用于非结构网格 (三角形、四面体网格), 并且经常与光顺方法共同使用。在 ANSYS Fluent 软件中, 共有 5 种网格重构方法: ①重构内部网格单元 (local cell); ②重构变形边界上的三角形面网格 (local face); ③重构与运动边界相邻的面网格 (region face); ④重构全部区域的网格单元以及面网格 (cutcell zone); ⑤重构 3D 区域中的棱柱层单元 (2.5D)。在本书的计算中, 联合使用 local cell 与 local face 方法实现动网格重构。

网格重构方法需要设置的参数主要有 5 项: ①最小网格尺寸 (minimum length scale), 重构的网格最小尺寸大于设置值; ②最大网格尺寸 (maximum length scale), 重构的网格最大尺寸小于设置值; ③最大网格歪斜度 (maximum cell skewness), 当网格歪斜度超过设置值时, 网格会被重构; ④最大面网格歪斜度 (maximum face skewness), 当面网格歪斜度超过设置值时, 网格会被重构, 只有在激活 local face 选项时才被激活; ⑤网格重构间隔 (size remeshing interval), 用于控制动网格更新频率。设置上述信息时, 通过 Mesh Scale Info 功能获取当前网格模型的最大网格尺寸、最小网格尺寸、最大网格歪斜度等信息作为参考。在本书的计算中, 动网格