



## 中国科学院微重力重点实验室简介

朱芙英

中国科学院力学研究所 100190

微重力科学是应运载人航天而发展起来的前沿学科。微重力环境为诸多科学问题的研究提供了机遇,孕育着自然科学的重大突破,并正在培育新一代高技术产业,是空间科学研究的热点。1995年9月4日总装备部(原国防科工委)正式下文批准筹建“国家微重力实验室”,由总装备部和中国科学院共同投资开始建设中国科学院国家微重力实验室。1999年7月实验室上报创新试点工作方案,并纳入中国科学院的知识创新工程体系。2003年4月实验室通过全面验收,成为我国微重力科学研究中心和用户支持中心。2008年国家微重力实验室顺利通过中国科学院重点实验室申请评估,并正式批准建立“中国科学院微重力重点实验室”。第一届实验室主任为胡文瑞院士,学术委员会主任为林兰英院士。第二届实验室常务副主任为康琦研究员,学术委员会主任为胡文瑞院士。现任实验室主任为龙勉研究员,学术委员会主任为胡文瑞院士。

实验室包括研究中心和用户支持中心,其基础设施包括一个建筑面积 $2194\text{m}^2$ 的4层实验楼,以及占地面积 $2450\text{m}^2$ 的百米落塔设施。研究中心的建设和发展紧紧围绕流体物理、燃烧科学、材料科学、生物力学与纳米生物技术等4个研究方向,引进和研制了百余台(套)仪器设备,建成了开展流体物理、燃烧科学、材料科学,生物力学与纳米生物技术等地基研究的实验系统,包括:(1)开展微重力流体物理研究的流体动力学、复杂流体分散体系、光学诊断和测试、三维显微粒子图像测速等;(2)开展燃烧研究的微重力两相流、微重力燃烧等;(3)开展空间材料科学研究的半导体晶体、气相外延、金属合金成核过冷、非透明介质、透明晶体生长等;(4)开展生物力学和空间生物技术研究的蛋白质晶体生长、空间细胞生长和组织培养、连续流电泳、微管吸吮、激光显微镊、原子力显微等;(5)开展纳米生物技术研究的光谱偏偏成像系统等。共同组成了国家微重力实验室的研究平台。实验室的用户支持中心,建成有可进行短时微重力地面实验的百米落塔设施,其中落舱系统的微重力时间为 $3.5\text{s}$ 、微重力水平可达 $10^{-5}\times\text{g}$ 量级,落管系统的微重力时间为 $3.26\text{s}$ ,微重力水平优于 $10^{-6}\times\text{g}$ ,可为用户提供各种技术支持和服务。迄今已利用落塔设施开展了20多个研究课题的上百次微重力试验,具备每天可以进行二次微重力实验的能力。

微重力研究强调基本规律的研究与应用研究相兼顾,强调重大基础理论的突破及将研究成果用于改善空间和地面的人类生活质量,促进地面高技术发展。实验

室科研工作定位在开展以具有重大应用背景的基础性研究为主,积极承担与微重力科学相关的我国航天高技术发展急需的工程技术研究,合理安排和促进微重力科学的基础研究;遵循科学与技术相结合、地基研究与空间设备研制相结合的研究模式,大力发展交叉学科,促进微重力流体科学与空间材料科学和空间生物技术相关的交叉学科研究,大力促进与生物技术(蛋白质晶体生长、细胞/组织培养、细胞生物微系统、蛋白质芯片)和材料制备(SiC制备、亚稳态金属和合金凝固行为、溶液生长、胶体自组装及微纳米结构器件)相关的模型化研究,发展相关高科技应用。国家微重力实验室的研究领域涉及微重力科学的主要方向,包括微重力流体物理(简单流体的运动、多相流和复杂流体),微重力燃烧科学(燃烧机理和空间站防火),空间材料科学(凝固过程、晶体生长和模型化研究),空间生物技术与生命科学(生物力学、细胞-分子生物学和纳米生物技术)。

10余年来,实验室承担和完成多项国家重大项目,已完成国家载人航天工程、科学实验卫星等空间实验项目11项,科技部攀登计划预先项目1项,国家自然科学基金重点项目4项,中国科学院知识创新工程项目2项,并承担中国科学院知识创新工程和大型装备等项目20余项、国家自然科学基金重点和面上项目20余项以及其它研究项目5项。在国家重大需求层面,“十一·五”期间国家微重力实验室已有5项空间实验列入国家载人航天工程(第二期)、7项空间实验列入实践10号卫星计划、2项空间实验列入中俄合作利用国际空间站俄国舱的有人操作实验计划、3项空间实验列入微重力火箭计划,上述空间实验的执行和成功完成孕育着一批重大的研究成果。在基础研究层面,“十一·五”期间国家微重力实验室将继续承担中国科学院知识创新工程方向性项目(第三期)和国家自然科学基金重点项目,加强微重力科学的创新研究。

在国家载人航天计划及有关国家重大项目带动下,实验室科研工作不断开拓和深化,在流体物理、燃烧、生物力学和先进诊断技术,以及与材料科学和生命科学的交叉与融合等领域开展了有特色的创新性研究工作。在流体物理方面,液体界面现象与热毛细对流的毛细对流及稳定性研究、毛细对流振荡机理研究、振荡毛细对流传流转变的可能途径研究,以及液滴热毛细迁移规律、气泡热毛细迁移及相互作用的研究;气液两相流动与相变换热规律研究和两层流体与蒸发对流、两层流体Benard-Marangoni对流的实验研究;复杂流动的分散体系稳定

性的微观诊断技术及机理、重力对聚集过程影响研究、胶体粒子的自组装过程研究;空间细胞-分子生物力学的细胞生物学过程的基本规律、实验技术及细胞聚集与粘附规律的研究;纳米生物技术的无标记蛋白芯片生物传感器研究;微重力实验技术的落塔落管技术、地面实验技术、载荷研制技术等都取得重大进展及创新成果.主要研究成果多次被国际会议安排做特邀报告,胡文瑞院士应邀在第22届ICTAM大会做分会大会报告,是迄今获此殊荣的第4位华人科学家,我国微重力研究已在国际上占有一席之地.

空间实验方面,完成多项返回式卫星搭载空间实验:1999年5月,在“实践5号”科学实验卫星上成功完成了我国首次微重力流体物理两层流体空间实验,在我国首次实现了空间实验的遥操作;1999年8月与俄国空间局Keldysh研究中心合作完成了“和平号”空间站气液两相流型的空间实验,在国际上首次实现了在长期、稳定的空间微重力环境下的有人操作的同类实验研究;2002年12月30日,国家微重力实验室自行研制的“通用流体实验装置”搭载“神舟4号”飞船,完成了“微重力液滴热毛细迁移实验”项目的各项空间实验任务,成功地对大雷诺数液滴热毛细迁移的非线性动力学行为进行了实验研究.第22颗返回式卫星搭载4项空间科学实验于2005年8月29日成功发射并回收.“实践8号”返回式育种卫星于2006年9月9日发射,在卫星留轨仪器舱上搭载涉及流体物理、燃烧科学、生命科学、基础物理等领域的9项科学实验,其中4项为国家微重力实验室的实验项目.国家微重力实验室空间科学实验活动从单纯搭载科学实验发展到如今具有从组织筛选空间试验项目到完成技术总体任务的综合能力.培养了一支科学与工程结合、具备开展微重力空间实验和组织实施能力的人才队伍.使中国成为国际上具备自主空间实验能力的少数几个国家之一,在国际上产生了较大影响,极大促进了国际合作研究,提高了我国微重力科学研究的国际地位.胡文瑞院士主编的专著《Advances in Microgravity Science》和系统介绍我国系列返回式卫星空间实验成果的专刊《Microgravity Science and Technology》相继问世,进一步提升了国家微重力实验室的国际学术声誉和地位.

10余年的努力,实验室逐渐形成科学与技术相结合、地基研究与空间设备研制相结合、不同学科互相交叉融合的研究模式,团结和凝聚了国内微重力科学研究力量,参与我国微重力科学和空间科学相关规划、指南的制订、重大项目的组织等工作.以胡文瑞院士为首席科学家的空间环境利用项目论证专家组,完成了国家空间科学发展规划有关微重力科学和生命科学部分的编写.由胡文瑞院士负责、组织专家进行空间科学战略研究,完成了由中国科学院学部国家中长期科技发展规划咨询项目“空间科学专题研究”.实验室作为中国科学院创新工程方向性项目“空间科学项目中长期发展规划”微重力科学的负责单位,组织并完成了微重力科学的《中长期发展战略规划》以及《2050年我国空间科学发展路线图研究》等.实验室正在负责实践10号科学实验卫星载荷总体和科学研究总体、国家载人航天工程二期应用系统流体物理分系统的研究工作等,为国家载人航天工程和空间科学计划、为发展我国微重力科学做出了不可替代的贡献.国家微重力实验室已成为我国微重力科学研究的基地和核心实验室.在2008年院重点实验室评估

中,国家微重力实验室以基础局前3名的成绩通过院重点实验室现场评估.

鉴于实验室突出工作业绩,国家微重力实验室获2005年国家人事部和中国科学院联合颁发的先进集体奖.“半浮区液桥热毛细对流研究”获1998年度中科院自然科学二等奖,“实践5号”卫星空间流体科学实验获2001年度中国科学院科技进步二等奖.中国载人航天工程(飞船应用系统)获2003年国家科技进步奖特等奖,力学所为完成单位之一,胡文瑞院士为获奖人.2000~2008年期间实验室已在重要学术刊物已在重要学术刊物发表论文460篇,出版专著(章节)13部.

国家微重力实验室积极参与国际微重力科学活动,开展卓有成效的国际合作与交流,在国际微重力界享有很高的知名度.1993年在北京召开了国际微重力科学学术会议,展现了我国微重力发展的初期水平.以此为标志,我国的微重力研究逐渐地与国际接轨,与国际主要微重力组织和机构有着广泛的学术联系.与比利时自由大学微重力研究中心、意大利MARS微重力研究中心、德国不来梅大学ZARM微重力中心、法国马赛大学、日本JAXA微重力研究机构以及俄罗斯力学问题研究所等国际著名的微重力研究机构有密切的学术交流,与各国空间局以及相关组织有深入的实质性合作.中日微重力双边会议已举办了七届,中德双边微重力国际会议已举办三届,中、法双方就共建国际联合实验室(Associated International Laboratory, LIA)已起草了合同文本、中俄已有多项航天合作项目等.实验室学术带头人受聘在多个国内外重要学术机构任职,实验室在国际上已有重要影响.

国家微重力实验室实行主任负责制.实验室学术委员会是实验室的学术咨询和评审机构.实验室目前设立流体物理、燃烧科学、材料科学、生物力学与纳米生物技术4个研究方向和相应9个课题组.国家微重力实验室建立和完善了日常运行的组织结构,制定了相应的管理条例.与中国科学院知识创新工程相适应,实验室在队伍建设方面实行按需设岗、竞争上岗的“开放、流动、联合、竞争”的运行机制,通过建立流动、竞争和保持相对稳定相结合的运行机制,以保持一支高素质的科研队伍和实验室的创新活力.经过10余年的建设与发展,现有固定编制人员39人,包括:院士1人、研究员11人,副研究员、高级工程师、高级实验师13人.目前有国家杰出青年基金获得者1人,中科院百人计划入选者4人,博士生导师8人.已培养博士50名,硕士34名,出站博士后19名.现在读博士生36名,硕士生21名.同时,国家微重力实验室采用固定人员和客座人员相结合的体制,吸收多方面的优秀研究力量、特别是院内相关学科的专家,在科学研究专业、专长方面与固定人员形成互补.实验室为科研人员创造良好的条件和研究氛围,为青年科研人员的成长发展提供广阔前景.

在今后相当一段时间内,国家载人航天计划和空间科学计划对微重力研究的需求越来越大.国家微重力实验室将继续以国家重大需求为目标,以积极推进微重力科学与应用研究、促进我国空间科学发展为己任,进一步加强科研、队伍和基础设施的建设,提高实验室的整体科研水平和运行管理水平,使之成为对国内外开放的、国际上一流的微重力研究中心,为国家载人航天工程和空间科学计划的顺利实施做出应有的贡献.

# 轨道交通控制与安全国家重点实验室研究新进展

唐 涛 马慧茹

北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044

## 1 实验室概况

轨道交通控制与安全国家重点实验室筹备于 2005 年, 2006 年 5 月获科技部批准建设, 2008 年 2 月通过科技部委托国家自然科学基金委组织的评估, 2008 年底, 实验室开始以实体化方式运作. 实验室主任为“百千万人才”国家级人选唐涛教授, 学术委员会主任为中国工程院院士、轨道交通专家孙永福教授, 常务副主任为国家杰出青年基金获得者、国家 973 计划项目首席科学家高自友教授.

实验室紧密结合国家轨道交通的长远发展与现实需求, 秉承“结合背景开展应用基础理论研究, 结合实际重大需求形成关键技术”的研究理念, 致力于轨道交通控制与安全科学技术方面具有创新性的应用基础理论和基础性工作研究, 为我国轨道交通控制与安全保障技术整体达到世界先进水平进行前瞻性理论技术储备, 以形成适合我国国情的具有自主知识产权的轨道交通控制与安全核心技术及装备体系, 建成轨道交通领域从事应用基础理论和基础性工作研究的国际一流的学科基地, 为我国轨道交通控制与安全领域的原始创新、集成创新、引进消化吸收再创新以及高水平人才的培养提供平台. 在原创性科学研究、取得国际领先的重大研究成果和培养杰出创新人才等方面起到不可替代的作用.

实验室依托交通运输规划与管理、交通信息工程及控制、通信与信息科学 3 个国家级重点学科及全国评估排名第一的“系统科学”一级学科, 通过整合确定了 4 个重点研究方向: (1) 轨道交通控制与安全基础研究; (2) 轨道交通安全保障与运输组织理论及方法; (3) 轨道交通运行控制系统分析与集成; (4) 轨道交通专用移动通信理论与关键技术.

实验室已建成的实验平台有: 城市轨道交通运行控制仿真平台、铁路工务基础数据平台、GSM-R 通信网络实验平台等研究实验平台. 这些实验平台可为交通运输组织、列车运行控制、轨道交通专用通信以及安全保障等方面的研究提供了试验环境.

实验室现有固定人员 54 人, 其中教授 17 人、副教授 23 人, 国家“973”项目首席科学家 1 人, 国家杰出青年科学基金获得者 1 人, “百千万人才”国家级人选 5 人, 教育部新世纪优秀人才计划 5 人. 现有教育部创新团队 1 个, 国家 973 项目研究团队 1 个.

2008 年, 实验室在承担国家重大任务方面取得了新进展, 新增国家 863 计划, 国家科技支撑计划, 国家自然科学基金重点、面上等多项研究任务; 形成了一些较有影响的基础理论和关键技术, 在 Transportation Research B、IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems、Science In China Series E 等高水平期刊上发表论文多篇, 授权发明专利 7 项, “大秦铁路重载运输成套技术与应用”获得国家科学技术进步奖一等奖, “JT1-CZ2000 型机车信号车载系统”获得中国铁道学会科学技术奖一等奖, “铁路列车运行安全全过程多元智能综合监控关

键技术及系统”获得教育部科学技术进步奖二等奖, “青藏铁路地理信息系统平台技术”和“机车同步操控系统 Abis 接口监测系统”各获得中国铁道学会科学技术奖二等奖.

实验室本着“开放、流动、竞争、合作”的运行机制, 通过积极承办国内外大型学术会议、邀请国内外知名学者来室访问讲学、邀请国内其它高校青年教师来室工作学习、派出实验室中青年骨干出国访问进修并积极参加国际学术会议等措施, 加强实验室与国内外学术界、同行的学术交流, 发挥实验室的平台作用和辐射作用, 扩大了实验室在国内外的影响, 力争将实验室建设成为我国轨道交通领域高水平科学研究、培养和造就高层次科学研究人才、学术交流的重要基地.

## 2 研究进展

### 2.1 轨道交通控制与安全基础研究

该方向旨在研究轨道交通流的动态和非线性特性, 以及高速铁路(客运专线)及城市轨道交通系统中有关控制与安全的相关基础理论与方法, 研究轨道交通控制与安全系统海量、多源、异构数据融合与集成的关键技术, 探索不同设备条件下的轨道状态劣化规律, 构建轨道交通基础与安全数据共享与服务平台. 2008 年主要研究进展如下:

(1) 设计列车最优运行决策算法, 建立列车调度模型. 在 Dorfman (2004) 的工作基础上, 结合优化的思路, 以列车的总的旅行时间最少为目标, 基于列车的全局信息, 设计相应的算法以确定各列列车的最优运行决策, 建立列车调度问题的模型. 在所设计的算法中, 根据列车在其运行路径上的所有冲突信息, 结合列车的局部优先权规则, 确定列车的满意的运行决策, 同时对单线路网中会出现导致系统瘫痪的死锁现象, 设计相应的解锁策略, 以预防和避免列车在运行过程中产生死锁现象. 结果表明, 在保持原有方法的优点的基础上, 解的质量得到了明显的改善.

(2) 应用复杂网络理论研究轨道网络的空间相关性. 在轨道网络交通流的基础上, 通过引进空间关联函数描述轨道网络的空间相关性. 首先是对轨道网络进行模块和等级划分. 其次, 在轨道交通流实测数据的基础上, 应用复杂网络理论研究轨道网络的空间相关性.

(3) 基于元胞自动机原理建立三线轨道交通系统模拟模型. 在实际交通中, 车站客流到达的不均衡性, 经常会出现在一个时段去往某方向的客流很大, 而去往反方向的客流很小; 而在另一个时段, 会出现相反的客流情况. 对于这种情况, 现有的复线轨道交通已无法满足运量的需求. 如果再扩建一套复线系统从而达到四线轨道系统, 虽有可能解决运量需求, 但工程投资巨大. 于是一些学者就提出了三线轨道交通系统建设的初步思路. 根据目前掌握的国内外文献来看, 还未有对三线轨道交通系统的运输能力进行相关的研究. 本成果基于元胞自动

机原理建立一种三线轨道交通系统的模拟模型,系统地讨论了三线轨道交通系统的运输能力问题。模拟的结果表明三线轨道交通既可以满足现阶段不均衡客流下的较大的交通运量,同时又比四线轨道系统节约大量投资。

## 2.2 轨道交通安全保障与运输组织理论及方法

该方向旨在研究轨道交通安全要素的复杂动态行为和安全风险分析、评估及控制方法,建立轨道交通安全保障技术体系;研究网络条件下高速铁路客运需求预测模型、运输组织模式及其实现机制与方法;研发符合国情的列车运行安全保障、应急处置和组织方案优化设计系统等。2008 年主要研究进展如下:

(1) 面向高速列车群运行安全的重大行业需求,对其综合监控信息库的构成、信息共享机制、列车群运行安全建模技术进行了研究,初步建立高速列车群运行安全综合监控试验平台。

(2) 面向铁路行业突发事件应急处置的重大行业需求,对铁路应急体系的构成、铁路应急救援指挥的流程、应急预案的数字化、应急指挥决策支持技术进行了深入研究,开发建立了铁路应急救援指挥试验平台,研发出实用系统应用到青藏铁路,取得了铁道部的技术审查成果。

(3) 面向城市轨道交通网运营安全的重大行业需求,对城市轨道交通网运营安全的车载安全信息获取、安全信息传输、安全信息综合监控和故障因果分析技术进行了深入研究,初步建立起城市轨道交通网运营安全监控与故障诊断试验平台。

(4) 深入研究了集列车开行方案、运行计划、动车组运用计划和乘务计划以及日常调度计划为一体的编制需求,建立了计划编制与调度调整一体化模型;研究建立了多类流并存条件下列车组织方案优化模型与算法;建立了列车流演化的动力学模型与旅客期望值目标规划模型。重点研究了在保证列车运行安全的基础上,提出了定时约束条件下列车运行节能的实时控制算法,该算法可在铁路实际运营环境下,进行列车优化操纵的实时控制与快速求解;研究并建立了多策略车载列车优化操纵指导系统。

## 2.3 轨道交通运行控制系统分析与集成

该方向旨在研究适于高速铁路及城市轨道交通运行控制应用基础理论与关键技术、安全系统设计与集成方法、复杂系统验证与确认方法,构建轨道交通运行控制系统测试评估平台,形成满足我国轨道交通运营需求的运行控制理论及技术体系。2008 年主要研究进展如下:

(1) 结合城市轨道交通特点,提出了基于通信的列车控制策略及系统结构,攻克了基于通信的移动闭塞控制、列车定位、数据传输功能安全通信协议、安全计算机等关键技术难题。自主开发了集网络覆盖设计、性能分析与测试为一体的 CBTC 无线网络优化平台。研制了适于 CBTC 的地面控制的 2 乘 2 取 2 安全计算机和适于车载控制的 3 取 2 安全计算机。提出了具有自主知识产权的 CBTC 系统技术框架和基于商用成熟(COTS 技术)软硬件平台的 CBTC 系统集成方法,并研制出一套具有完全自主知识产权的、达到国际先进同等水平的国产城市轨道交通运行和控制系统(CBTC 系统)。2008 年在大连快轨实际运营线路上建成 8.9km 长的首条自主知识产权的 CBTC 的中试试验线路,现已实现多列车高密度追踪控制,各项指标达到国际先进水平。

在上述成果基础上,北京市已启动“北京轨道交通

核心技术研发及示范工程”重大专项,利用国家“首台套政策”,依托北京亦庄线建设自主研发地铁信号核心技术示范工程,完善一个自主创新的国产信号系统,建成一个安全认证体系,制订一个规范和标准,培养一批高水平、经验丰富的专业建设、运营和维护人才,摆脱国外的技术垄断,并且也彻底解决了困扰国内信号系统多年国产化的“鸡生蛋、蛋生鸡”怪圈,对于推动我国轨道交通核心技术的自主创新具有重要意义。

(2) 初步建立满足高速铁路需要的 CTCS-3 级列车运行控制系统仿真平台,该平台通过分布式网络构建了包含轨旁仿真器、联锁仿真器、调度集中仿真器、列控中心仿真器、列车仿真器、无线闭塞中心、车载设备等半实物仿真环境,并以实际线路条件对 CTCS-3 级运行控制系统总体技术方案进行了验证。

(3) JT1-CZ2000 型机车信号车载系统获得中国铁道学会科学技术一等奖。该成果研究了轨道电路信号影响机车信号主体化的内在机理,创造性地提出了既有机车信号主体化的解决方案和工程实施方法。攻克了机车信号安全性技术、可靠性技术、抗不平衡电流干扰技术、信号制式自动识别和载频自动切换技术、可维护性技术等关键技术,实现了机车信号主体化的自主创新,为铁路大提速提供了重要支撑。在此基础上应开发的适用于 350 km/h 客运专线的轨道电路信号接收模块已成功应用京津城际 350 km/h 高速动车组上,为保证高速动车组的行车安全发挥重要作用。

## 2.4 轨道交通专用移动通信理论与关键技术

该方向旨在研究在资源受限情况下基于多域资源综合利用实现高速、高可信的轨道交通控制与安全信息传输理论及技术;研究高速铁路无线电波传播特性、可信编码理论及实现技术,形成我国高速铁路无线通信(GSMR-C)理论及技术体系。2008 年主要研究进展如下:

(1) 构建轨道交通专用通信及宽带无线移动通信平台(无线信道仿真子平台)解决方案。该方案包括信道测量、信道建模与仿真、网络仿真、设备检测与认证 4 部分,其中信道测量是整个平台的基础,为其余 3 个方案提供测量数据。信道建模与仿真为网络仿真和系统检测与认证提供无线信道仿真环境。网络仿真是设备检测与认证的前提,并为设备检测与认证提供检测方法 with 指标依据。

(2) 轨道交通专用通信及宽带无线移动通信平台(列控安全数据传输子平台)的研究及建设工作。

搭建 CTCS-3 列控车-地安全数据传输系统,初步完成车载通信单元和地面通信服务器的建设,利用 GSM-R 网络,为 CTCS-3 级列控系统车载 ATP 和地面 RBC 提供全双工、面向连接的、可靠的数据传输通道;完成 CTCS-3 级列控系统车-地通信平台中,ETCS SUBSET-037 定义的 CFM 的所有功能,包括通信接入、链路层(LAPB)、网络层(T.70)、传输层(X.224)。

搭建 CTCS-3 通信接口监测系统,主要针对 GSM-R 网络内部接口以及 GSM-R 网络与 CTCS-3 RBC 之间的接口开展监测,监测接口包括:PRI 接口(GSM-R 交换机与列控 RBC 间接口)、Abis 接口(GSM-R 基站与基站控制器间接口)、A 接口(GSM-R 基站控制器与交换机间接口)。其中 A 和 Abis 接口属于 GSM-R 网络内部接口,车载设备与 GSM-R 网络的 Um 接口交互情况也通过 Abis 接口进行跟踪和监测,PRI 接口是网络与 RBC 之间的接口。