

散射谱仪的设计、建设与调试工作。中子散射与中子物理是两个并不不同的研究领域，如何完成国内第一台中子全散射谱仪的物理设计，并达到国际先进水平，对我来说是一个全新的挑战。相比中子衍射，全散射谱仪的优势是可以开展无序材料在原子尺度上的结构研究，因此如何保证谱仪的实空间分辨率是一个非常大的难题。选择合适类型慢化器，设计合理的飞行时间，保证超热中子通量，减少样品处的角散，并降低超热中子带来的背底是设计的重点和难点。反复思考，反复推倒重来，与工程参数不断的迭代设计，最后谱仪的工艺测试表明谱仪中子通量和分辨率都优于设计指标，特别是谱仪在实空间的分辨率达到了 0.1 \AA ，这是一个非常高的分辨率，一个了不起的值。

同时团队共同努力，尽管2020年受到全球疫情影响，谱仪还是提前半年完成验收。谱仪参数的反复优化设计，特别是与工程参数不断迭代设计是一件很令人疲惫的事情，同时也不会有新的研究成果产出。所以我常想是什么让我忍住了“就这样吧”的冲动，必须说女性的耐性和心平气和于此帮了我和团队的大忙。

由于在散裂中子源的出色工作，我获得了2020年“中国科学院优秀共产党员”和“全国三八红旗手”等荣誉称号，这对我来说是一个非常大的荣誉和激励。尽管长期工作在东莞，远离了家人，我仍觉得自己是很幸运的人。作为一名普通的科技工作者，有幸生于民族复兴的伟大时代，正是这个时代让我们有机会去实现自己的想法和梦

想。一个人一生中有机会把自己的研究结果变成图纸，变成设备，变成国家大科学装置，变成国家科技发展的一个重要支撑平台，这是多么难得和多么幸福的事。

我周围有不少优秀的同事和学生都是女性，越来越多的女性能选择自己的人生和道路，也越来越不需要去考虑平衡生活和工作关系。女性在工作中表现出来的专注、韧劲和敏锐，使她们在科研工作中有自己独特的优势。很多人认为女性超越男性是因为认真、肯吃苦或会考试，千万不要小瞧了这几点，肯吃苦，能吃苦，能把死书读活，这同样是很重要的能力。作为一名普通的女性科技工作者，祝愿越来越多的女性能在自己喜欢的领域成就自己的事业，心有所想，思有所得，如有所愿。

二分之一科研路

姚蕊[†]

(中国科学院国家天文台 北京 100101)

今天又是一个忙碌的周五，夕阳西下总算能闲下来空空脑子，然后准备去接孩子放学了。这时想起了还有这篇约稿，坦白说，让我来写自己的求学、工作经历与感悟，我有些忐忑。我自认不算是成功女性代表，更多的是在FAST的光环下，让大家看到了一名FAST科研技术人员的工作状态。我将顾虑告知朋友，朋友说，科研技术人员中

的大多数人就是像你这样，在自己的岗位上做好自己的事，这就是你可以分享的——真实的自我，真实的困惑，真实的感悟。听完她的话，我豁然开朗，决定写下自己求学和工作中的几点感悟，也许里面能看到你的影子。

起源：最单纯的兴趣

兴趣是最好的老师，但有时也会让人迷茫

我的工作单位是中国科学院国家天文台，所以经常被误会是学天

文，仰望星空的小姐姐，可惜，我不是一个浪漫的人，但我也喜欢那些能探索太空的东西。从小我就像个“假小子”，喜欢那些男孩子感兴趣的车、手枪、火箭、飞船……妈妈对于无法培养一个淑女多少有些遗憾，但是爸爸却对我这样的性格很满意，带着我一起倒腾家里的家电。这是最初始的兴趣启蒙。

刚刚上高一的时候，因为语文老师口音太重我听不懂，成绩下降了不少，让我有一些失落。幸好那时候的物理老师欧阳老师来到我

2022-02-06收到

[†] email: ryao@nao.cas.cn

DOI: 10.7693/wl20220303

们班，他生动有趣的讲课方式让我对物理充满了兴趣，物理成绩的提升帮我把总分拉了上来，使我慢慢找回了自信，还带动了数学成绩一路飙升，保持在年级前几名。很可惜的是，高二欧阳老师不带我们班的物理了，但是因为他的教学，让我坚定了学习理科的选择。我还记得高三文理分班出来的那天，我正准备去看看分班情况，就遇到了欧阳老师，他一看到我就笑着说，“你又到我的班级了”。那年，我进入了物理重点班，准备高考，欧阳老师担任我的班主任。

在填写高考志愿时，物理老师和数学老师都鼓励我报考物理或者数学专业，但是因为我自小在父亲的机械绘图板上长大，更渴望看到知识落地变成实物的过程，所以第一志愿填了“机械工程”。高考分数出来后，我如愿进入北京航空航天大学机械工程学院，学习机械设计及其自动化。班主任欧阳老师不忘叮嘱我要学好基础知识，为进一步深造做准备。

大学生活让人向往，也令人迷茫。我还记得开学的第一次班会上，辅导员问班上有几个第一志愿报的“机械工程”，全班只有我举手，剩余大多都是报了计算机系调剂过来的，我既有种骄傲：看，全班就我上了第一志愿！同时，也第一次有了一种迷茫：我是不是选错专业了？

迷茫很多时候是来源于不确定。就像我大学前两年，基础课程对我来说枯燥艰涩，总觉得基础知识和实际应用差距很大，有种不接地的感觉，直到大三专业课上完，我才慢慢找到两者的准确结合点，同时也发现，四年的大学生涯并没有让我掌握足够的动手和解决

实际问题的能力，我觉得自己离工程师的道路越走越远。即将毕业时，我不得不思考，对于我最初的兴趣，是放弃还是坚持？在迷茫中我的思考方式简单粗暴，但是也很有效，仅仅是问自己，我希望30岁的时候是什么样，40岁的时候是什么样？我发现无论怎么刻画，都无法放弃成为机械工程领域专业人员的可能性。既然我无法放弃，那么就再坚持一下试试！所以有时候比起想得到什么，也许问问自己无法舍弃什么，会更快得到答案。因为无法舍弃的，也许就是你必须追寻的。

坚持：成就感增强信心

决定后就义无反顾地尝试

既然已经决定继续从事机械工程工作，就必须再提升自己的能力，于是我冲刺了一年，2005年如愿进入清华大学精密仪器与机械学系攻读研究生。

我所在的研究室是先进制造装备实验室，主要从事并联机器人的研究，应用背景指向工业化场景，像多轴机床及主轴头、运动模拟器等等。研究室算是一个大组中的一个方向，5位老师带着20多名学生。不管研究生的导师是谁，学生可以随时找这5位老师寻求指导，他们都会全力帮助并培养我们，所以我们是在一个大家庭中学习成长。

我很喜欢研究室的培养机制。老师以课题项目为导向，引导培养学生进行科研选题和研究，很有挑战性，我觉得乐趣无穷。老师鼓励我们早早进入实验室熟悉环境，做文献调研，并且只要自己愿意，可以提出来开始做一些力所能及的研究工作。所以一进研究室我就和硕士导师李铁民老师提出画大型机床



图1 作者近照

的三维图和运动仿真的工作。我喜欢在实际工作中学习知识，这让我更容易理解知识内容、相互关系和应用方向，还可以通过查阅资料和向师兄师姐请教的方式快速吸收知识。这样的一些方法，使我很快掌握了软件使用，并初步了解了并联机构的基本特性和构成，开始学习写并联机构的运动学逆解算法。紧张而充实的学习过程，为我后面的研究打下了很好的基础。

2005年年底，半年的课程学习结束。在准备进入正式的研究工作时，我和500米口径球面射电望远镜(FAST)的缘分就开始了。

那年我们研究室的唐晓强老师和国家天文台合作进行FAST馈源支撑系统的研究，这个系统里面用到一个大跨度索并联机器人和一个刚性并联机器人进行馈源的高精度定位。我们研究室对于里面使用的刚性并联机器人有比较好的基础，但是索并联机器人还没有涉及，唐老师问我愿不愿意尝试一下。我的第一反应是：我连并联机器人都没搞明白呢，现在要做索并联机器人，而且这个是研究室的全新方向，整个研究室的学生就我自己

做，感觉会孤立无援。但是，也就是因为我没有任何基础，任何研究对于我来说都是全新的、挑战的，所以反而顾虑很少，我完全被全新的研究背景和研究内容所吸引，当场就答应了唐老师做这个项目。

我开始查阅大量的论文。我喜欢从实际应用出发，先阅读一些有试验结果的论文，从而看到他们认为的关键问题，然后反过来针对这些问题再进行调研。幸运的是，因为研究室之前没有索并联机构的研究基础，所以我不会被预设问题或者选定研究方向，而必须从各个方面去了解索驱动机构，自己去挖掘问题和找到解决方法。也在唐晓强老师的帮助下，我向力学系的任革学老师请教了很多，从自身机器人机构学到力学，再到模型搭建和控制调试都有了一定的了解。我也从之前的研究中发现“虚牵”这个有趣的问题，虽然大家都知道索力和控制精度是有关系的，但是没有人将这个关系表达出来，这样就造成“虚牵”一直无法定量解决。“虚牵”仅仅是索力的一个表现，索力还和刚度、工作空间等主要性能指标相关。所以，索力特性是索并联机器人最重要的一个特性，并且能够在很大程度上反映机构的性能水平。那么，如何完成这些特性之间

的数值相关，从而指导索并联机构的优化设计，这是我为自己选定的研究课题。

随后几个月我对索力的变化曲线充满了兴趣，这是我第一次感受到“专注研究的乐趣”。几个月的研究小有成果，唐老师鼓励我写一篇学术论文，在其指导下，我向《机械工程学报》投出了自己的第一篇论文，得到了很好的反馈。正面的激励和成就感增强了我的信心，也让我萌发了专业从事研究的想法。

科研：一环扣一环， 需要步步精心

问题驱动，更容易看见本质

从2006年开始，我跟着唐晓强老师到国家天文台参加了很多次研讨会，经常是乌压压的一屋子人，讨论着方案进展，还会激烈讨论一下遇到的问题，我一般都是坐在最后一排倾听。FAST那时候已经建立过很多个试验模型和装置，但是很多方案细节还是没有确定，都需要论证。大家说的很多研究我都听不懂，对于科学需求也不能真正理解，只能通过他们的解释勉强了解这些科学需求会体现在望远镜的哪些性能上，又会分解到每个系统中的哪些性能上去。

我依旧安心做我的研究，准备尝试将科研作为终身职业的可能性，所以我在2007年正式转博，开始了博士生涯。对于我来说，博士不仅仅是学习知识、锻炼能力的过程，也是考察自己是不是具备从事专业科研能力的机会。我的博士导师是汪劲松老师，他曾是我国最早

一批研究并联机器人的学者，并且也是他规划了包括我们研究室在内的大课组的主要研究方向。他教导了我如何找到科研的视角。记得有一次开会，他让所有的学生说说自己的研究方向和思路，他一一点评后，让我们自由提问。有师兄问汪老师，创新从何而来？汪老师说技术创新有两个主要来源，一种来源于涉及的理论，也就是你能够清楚理解大家解决一些关键问题时常用的理论，并且具备足够的基础知识和敏锐性，发现理论中的不足或者错误，进行提升和修正，或者提出全新的理论。第二种，就是来源于实际应用，从源头出发，从实际问题出发，提炼出别人没有发现的关键问题，并进行攻关。这段话我至今记忆犹新，我特别喜欢第二条路线，我觉得这个更贴近问题的本质，更具应用价值，技术科学的目的就应该是应用。所以我时刻提醒自己，要从问题出发，必须理解清楚问题，而不是盲目研究。

但是，即使发现问题，也并不容易将问题表述清楚和解释清楚。那时候我对大跨度索并联机构的研究愈发感兴趣，尤其是索力和控制精度的关系。我发现索并联机构的索力会在一些位置对于控制误差特别敏感，如果在那些位置有点扰动，虽然看起来那点位置误差对望远镜性能没什么明显影响，可是却会让索力出现一个大幅变化，某根索可能索力突然变化，例如突然变小，从而降低了系统的刚度和稳定性，对后面运动的安全性和控制精度都会产生很大的影响。发现了这个问题，我还必须表达出这个问题的数值影响，不然在索力优化时就没有对应的指标参数可用，无法通过优化来解决问题。当时我一直在



图2 在FAST施工现场为馈源舱第一次升舱做准备

做各种尝试，结果不太理想，有一些苦恼，但是因为我做的研究不是单点研究，而是针对大跨度索并联机构的多个力特性的研究，正好那段时间，我还在进行索并联机构的刚度分析，消化了我很多不安情绪。

在进行索并联机构的刚度分析时，我在唐晓强老师的支持下，得到了一笔搭建试验模型的经费，老师还同意让我自己尝试设计搭建这个模型。对于一个学机械工程并一直想自己动手设计的学生来说，这是多好的机会。更难得的是唐老师给我的托底，他让我大胆尝试，不用担心失败。这一下子就打消了我很多顾虑，毕竟加工一套装置是需要不少经费的。那段时间我开始习惯晚上夜深人静的时候画图，在34号楼的7楼宿舍里看过楼下紫荆操场凌晨2点多的夜深人散，也看过5点的晨跑。认真钻研的过程里我收获了自己的第一个研究试验模型和第一篇SCI论文。也是在这个模型的试验里，采用的离散测试让我突发奇想用离散方式表达索力和控制精度的关系，居然效果不错，得到了数值解，这个指标的雏形终于出现。

接着，我便尝试用这个指标结合安全索力指标形成了力特性指标体系，用于索并联机器人的尺寸优化，在2008年得到了我的第一组FAST馈源支撑系统索并联机构的尺寸和俯仰角度优化值。随后唐老师和国家天文台签署合同，要在密云搭建一个1:15馈源支撑相似模型，这将是FAST建设之前的最后一个论证方案的相似模型。

有了前面的研究基础，再加上小模型的设计经验，这次当唐老师再问我要不要试着设计40 m的模型时，我马上答应并且跃跃欲试，

40 m尺寸的模型已经是一个不小的望远镜了，非常具有挑战性。我完成了15 m的高塔、馈源舱舱罩，以及索并联机器人的所有尺寸相似设计和机械设计，电机的选型计算，钢丝绳的调研购买等等。

在进行索并联机构的驱动装置设计时，我发现之前的设计都是用卷筒，为了达到高精度，必须在计算模型中考虑卷筒的螺旋曲线、多层叠绕以及出索方向变化带来的出索位置变化等等，需要建立非常复杂的数学模型才能计算精确索长。虽然之前大家习惯这样的设计方式，但是并不代表这是唯一解。我更愿意从需求出发，遵循“简单而美”的设计思路。我将螺旋轮换成了两个直线轮，解决了螺旋出索和叠绕问题，使用配重动滑轮解决了索力张紧和索长精度问题，又采用随动滑轮解决了出索位置准确性问题，一举三得。这个设计效果很好，得到了老师的赞许，也申请获得了发明专利。

2009年模型搭建完成，在唐老师的带领下，又经过3位师弟的辛苦调试，我们在2009年底得到了很好的测试数据，满足了所有技术指标要求，验证了这套方案的可行性。这些测试数据写入了我2010年的博士学位论文，而这套六索并联机构也用于最后FAST的设计中。

回首研究生的5年时光，我是幸运的，从一项研究的背景调研、关键问题提炼、研究攻关到试验测试，全链路的研究过程对研究人员来说是弥足珍贵的经验。得益于老师和



图3 FAST高精度馈源支撑系统采用刚柔两级调整机构，是FAST三大自主创新之一，为世界首创。图中间设备是世界上最大的、跨度达600 m的柔索并联机器人，可以牵引重达30吨的馈源舱

同学的帮助，科研投入里的每一份努力都在不知不觉中汇聚起来，最终研究成果水到渠成。毕业后我的何去何从也变得简单而坚定，专业的科研工作者成为了我的第一选择。

工作：是我愿意终身从事的事业

单纯的心面对一切，一切都将变得
单纯

2009年底，我接到了FAST馈源支撑系统总工朱文白老师的电话，邀请我参加FAST的面试。面对即将毕业的工作选择，我询问了导师汪劲松老师，他帮我分析了很多，有句话触动了我，他说要做“有意义的事”。我茅塞顿开，打消了心中最后一丝犹豫。2010年春节过后我收到了FAST的正式录用通知，7月22日开始了我的职业生涯。

即使在进入FAST团队之前我已经做了4年多的FAST馈源支撑系统研究，即使馈源支撑系统的每位老师我都已经熟悉，但是工作给人的感觉很不一样。我必须适应从研究生到科技工作者的身份转变。FAST是科研和工程的结合，所以我进入这个团队，必须做好两个方面的事情：一是规划自己的研究路线，二是学习工程思维。

研究路线看似很简单，但是对

于与工程结合的研究路线，我有两个层面的考虑：第一是确定自己的研究大方向。我从一开始就非常确定自己要坚持以机器人机构学为基础的研究方向，这就意味着机器人机构学相关的研究我都需要扩展学习，并且主要的研究攻关最好都是围绕该主题，这样可以让研究具备延续性；第二就是进行工程科学研究。概括起来就是，主要依托FAST，将研究方向和工程结合，依托工程问题，重点探讨其中的相关科学问题，并以此为自己在机器人机构学方向积累研究和技术实力。当然，这个过程不是一蹴而就，需要通过时间摸索和调整。

工程思维真的是必须经历过工程建设才更能体会。根据立项批复，FAST从2011年开始建设，建设周期5.5年，要求在2016年9月完成主体工程建设。我们这一批年轻人也在2012年被委以重任，担任各个分系统负责人，我在那年开始担任馈源舱负责人。负责伊始，我需要面对技术攻关、工程接口、进度安排、经费控制、质量把关、施工安全等等数项工作。不同于研究，工程是大团队作战，需要考虑各方面因素，寻求“最优方案”。这个过程中，我特别有感触的有以下几点。(1)梳理问题。一旦工程时间过长，就容易忘记最初方案制定时的依据，也容易走偏，所以需要经常梳理问题，这也是我们的系统总工朱文白老师的建议，他会要求我们做好记录，我之后也发现这都是财富；(2)相信团队。工程涉及方方面面，所以要集思广益，特别是前面阶段，要发散，后面实施阶段要集中。很幸运的是，我们FAST团队一起作战，克服了很多困难；(3)适当创新。所谓适当，是因为工程中

可靠性、安全性和全局性会压倒单一创新，如果一个创新技术综合衡量对于整个工程无益，那么完全没有必要强行用创新，一项技术用到最适合的领域才是最好的。

有人问我在做FAST的时候有没有过担心，担心自己做得不够好，担心FAST建不成？听到这个问题，我脑子里闪现了很多人，首先就是南仁东老师。我想起南老师和我探讨馈源舱的工作，从方案确定，到关键技术攻关、图纸审核、经费额度、进度把控等等。每一次与南老师探讨问题其实也是引导我思考。比如他会问我馈源舱里面Stewart平台的一个支链的设计细节，其实那时候有专门的乙方团队做详细设计，如果我们想偷一下懒，只要掌握主要关键技术就行，但是在南老师的影响下，我们会从大方向到技术细节的不同层面去把握工程实现。回过头来想，正是因为对每个细节的把握，才会让我对馈源舱的性能有足够的认识，遇到问题时才能找到原因，才不会有那么多顾虑和担心。所以，专注于事情本身，解决问题本身，才能消除掉焦虑和烦扰。

表达：研究能做出来，也要能说清楚

除了多练多听，似乎没有什么捷径

一位我很尊敬的学者说过，作为研究人员，要懂得将自己的研究表达出来，这个过程也是对自己研究思路的梳理，如果无法表达清楚，那么可能里面还是有一些问题没有思考清楚。

我非常认可这一说法，但是听到这个说法并从内心认可的时候我已经从事科研工作整10年了，看似有些晚了。但我很幸运，在真正懂

得这个道理之前，就被好好“训练”了一番。

时间回到2006年，我在前面提过在清华的研究室有5位老师，其中有一位是刘辛军老师，他在机器人机构学领域基础坚实，学识渊博，当时还负责研究室的学生管理工作。为了能够促进我们相互交流，共同提升研究能力，刘老师要求所有研究生每周三下午轮流做报告，研究室的老师和同学都参加并可以提问题和意见。刚开始的时候，场面一度很“惨烈”，特别是我们这几个新生，没有做过学术报告，连PPT的基本架构都还无法准确掌握。我已经记不清楚第一次报告的具体内容，但是还记得那种腿抖心颤的感觉，收到的意见让我感觉PPT里每一个字都需要修改，备受打击。但是，第二次的报告就有了很大的改善，在老师和研究室同学的帮助下，我越来越能在学术报告中表述清楚自己的研究内容。当听众理解我做的事情，他们就能给予我更有效的交流和意见，我也越容易发现自己研究中的不足和可以尝试的方法，提高研究能力和成果水平。在学术报告会上，聆听实验室其他同学的报告也是重要的学习机会和过程，学习他们的研究方法、研究思路，也包括做报告的方法和思路。研究生的几年时间，研究室的学术报告会绝对是最宝贵的时光之一。我从最开始害怕星期三的下午，变成了期待星期三的下午，在这个过程中，我也顺利地完成了开题报告。

努力都会被看见的。2007年刘辛军老师和韩国首尔大学的机器人实验室进行学术交流，他让我试试用英文作报告，介绍自己的研究。这是我第一次参加国际学术交流，

我知道不能按照中文报告简单翻译，还要考虑报告逻辑和控制时间，我尝试做了讲稿，反复多次调整PPT和报告内容，最终报告顺利完成，我也养成了演练报告的习惯。在国内外学术报告和交流中，我不断找到研究的不足点，也有更多机会听到和学习到国内外不同领域学者的意见，这使我的科研工作受益匪浅。

在科学研究的道路上，学术交流和学术报告是一个不可或缺的展示成果、寻求专业意见、看到先进成果的机会和平台。而学术报告能力也促进和提升了我的研究能力。

创新:对未来的憧憬

创新不是无水之木，来源于平时的积累

做大科学工程的人会被问到一个问题：FAST已经建成了，你后面

怎么办？我的回答是：工程任务已经变成了运行和维护，这仍是我们工作的一个重要部分，因为我们要尽最大努力保证FAST高效运行，为天文学家争取到最高的观测性能。而科研也同样是我们的重点工作组成，并不会因为FAST的建成而停止，我们有自己的研究方向，也有来自天文学家的需求，这里面蕴含的科学问题都是研究的动力和目标。

我热爱自己的工作，和同事们在一起进行工作的优化，建立新的维保管理系统，旨在积累更多的有用数据用于望远镜的功能性能升级。我也在做完FAST馈源舱后继续研究，希望进一步提升它的性能。我发现馈源舱的性能水平受限于本身的构型，所以尝试用新的构型来提升FAST馈源舱的性能，经过一年的初步设计和研究，发现新

的构型具备这样的可能性。目前，我的研究方向就是采用柔性的馈源舱设计提升馈源的观测角度，从而扩展FAST望远镜的观测天区，为天文发现提供更多可能。

我的一些创新来源于对工作的热爱和积累，因为热爱所以一直念想，因为积累所以找到创新之路。科技创新之路有我，我的研究之路有创新，真好！

写到最后，感觉这篇文章更像是一个送给自己的礼物，让我重走和梳理了来时的路，这份初心让我更加充满了力量。说来也巧，今年离我考上大学已经21.5年，如果还是60岁退休的话，恰恰还剩21.5年，那么就当重新出发，21.5年再回首时，我希望还能记得自己最初科研的样子，还保留最初科研的激情和理想。

缘起物理所

杨雨欣[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

在写作本篇时，说实话我的内心高兴又忐忑。高兴是因为有一个机会可以和大家分享点滴学习过程，忐忑是因为我本科并非物理专业，进入物理学领域进行科学研究的时间尚短，尚无出彩的工作。但一路走来，与物理结缘，与物理所结缘，有幸让我在最好的年纪里收获颇丰。

说起物理，脑海中会时常零星

地浮现一些画面，仿佛过去了很久，又仿佛刚刚发生。跟随记忆的脚步，回到十年前，我正在一所农村学校上初中，那也是我最初接触物理的时候。相对于化学反应的多彩和新奇，物理原理给我的感觉更加质朴和深邃。不论是光的色散现象，还是凹凸透镜的神奇成像，或者是阿基米德浮力原理，抑或是杠杆撬动地球的离奇假设……可以说，从一开始认识物理，我就被深深地吸引了。也正是因为物理学这份吸引力的存在，初中物理的学习

过程对于我来说是愉快而轻松的。不同于有些同学对于物理的不解和懈怠，我对物理课上的知识点始终满怀期待和热情。在课堂上，我可以随着老师的授课学习物理知识——任何匀速运动或是静止的物体都是受力平衡的，物体都具有惯性；声音和光在介质中的传播速度是不同的；凸透镜对光线有汇聚作用……在课后我也能从生活中理解一些未知现象的本质——开车时总会不自觉后仰；雷雨天总是先看见闪电再听到雷声；透过放大镜看东

2022-01-25收到

[†] email: yangyuxin19@mails.ucas.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220304