

点点头，有时则紧抓着我的手，看着我，像是希望我一直给他讲下去……

2020年1月19日，在与病魔斗争了10个多月后，方先生永远地离开了我们。回顾30多年来与导师一同工作的时时刻刻，深感方先生学识之渊博，认识之深刻，胸怀之宽广，精神之永恒。作

为他的学生，能够追随他的足迹，并肩为心中理想奋斗，沿着所指方向前行，实属荣幸。我仍需尽全身之力，毕一生努力来追赶，回报国家和社会，以告慰先生在天之灵。

落其实者思其树，饮其流者怀其源。谨以此文纪念我的导师——方守贤先生。

## 方守贤先生与洁净核能研发的往事片段

傅世年<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2020-03-26收到

<sup>†</sup> email: fusn@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20200504

2020年1月19日敬爱的老师方守贤院士永远地离开了我们，大家再也听不到他洪钟般爽朗的笑声。由他开拓的加速器驱动洁净核能系统(ADS)研发事业，正在我国有声有色地强劲发展。作为学生，我以此短文，追忆方先生当年指导我们开展ADS研究的一些往事，以此缅怀先生对我国科技事业的杰出贡献。

众所周知，以中国首台大科学装置BEPC为标志，方守贤是我国高能加速器的主要奠基人之一，为高能物理的研究作出了卓越贡献。但其实，除了高能物理外，方先生还非常重视粒子加速器的其他各种应用。如同步辐射、质子治疗，散裂中子源和ADS等，他在推动这些重大应用项目在我国落地开花、繁荣发展上，起到了举足轻重的引领作用。

1999年，在科技部“973计划”的支持下，启动了加速器驱动洁净核能系统的基础研究项目。在此之前，从1995年开始，由于受到诺贝尔奖得主C. Rubbia提出的“能量放大器”概念的激励，我国科学家们就在酝酿这件大事。方守贤先生与复旦大学同班学友丁大钊院士一起，同国内众多核科技界的专家们多次召开裂变核能战略研讨会，商讨我国开展ADS研究的战略共识和规划部署。当时正在参加“863计划”自由电子激光项目的我，被丁先生调来参加这些会议，与专家

们研讨学习。由此机会，我有幸与方先生相识。

再后来，我成为方守贤先生的在职博士研究生，在他的指导下，开展强流质子加速器的研究。由于当时我国在强流质子加速器领域的研究基础还比较薄弱，方先生推荐我去日本高能物理研究所(KEK)工作，参加了日本大型强子装置J-PARC加速器的物理设计和技术研究。在日本两年的研究工作很快接近尾声，正值美国散裂中子源开工正缺人员，橡树林实验室的朋友要我从日本赴美。我将此事告诉方先生，他狠狠地批评了我一顿，他说：“科学无国界，科学家有祖国，你必须把在国外学到的知识回报祖国。”不久，他又告诉我一个好消息：研究ADS的“973计划”项目成功获得科技部批准，并说，我回国可以承担加速器的研发重任，比在国外为老板打工强得多，建设我国自己的强流质子加速器，比为美国服务更有自豪感。他的谆谆教导和严厉批评触动了我，我和家人从日本直接回到了国内，从中国原子能科学研究院，调入方先生所在的中国科学院高能物理研究所，并在他的指导下，全身心投入到ADS的研究中。

为了我国核电的大发展，亟待解决裂变核能可持续发展中的3个瓶颈问题：(1)提高核燃料的资源利用度；(2)高放废物的最终处理；(3)进一步提高核电的安全性。ADS系统是集成20世纪核

科技两大装置——核反应堆和加速器的创新性技术，是解决这些难题的最佳技术路线。它能以更高的增值率、更短的增值周期，把U238或钍232转化为易裂变的核燃料，从而显著提高资源利用率；不仅系统本身只产生极少量的放射性废物，且在产能的同时还可嬗变由其他普通核电站产生的核废物，使这些核废物中长寿命放射性核转化为短寿命与低毒性的废物；该系统还应具有本征安全性，能从根本上杜绝发生临界事故的可能性。ADS系统主要由4部分组成：1) 中能强流质子加速器；2) 散裂中子靶；3) 次临界反应堆；4) 原址的放化分离设施。“973计划”的主要内容就是针对这4个部分开展相关的基础研究。

能量为1 GeV左右的中能强流质子加速器是ADS的驱动器，它的低能端由离子源、射频四极加速器(RFQ)组成，“973计划”项目的重点就是掌握低能端的核心技术。分配给RFQ加速器的研究经费仅有1200万元，不足以研制一台RFQ加速器，只能做一个模型样机。好在高能所时任所长陈和生对项目非常重视和支持，他利用与欧洲核子中心(CERN)的良好合作关系，从CERN无偿要来了一套LEP退役下来的射频功率源，价值上千万元人民币。有了这个设备，我们就有可能研制一台RFQ加速器，开展出束实验。不过，项目组内部还是有人担心课题变大，不仅研究难度加大，经费会变得十分紧张。要知道，当时美国的核武器项目建造的类似加速器花费了上亿美元，而且技术保密，方守贤先生和王乃彦院士等一行专程去美国Los Alamos国家实验室访问，走到该加速器大厅门口时美方接待人员突然接到通知，改口叫停，不许进入，结果我们的访问团只能远远地望了望这台加速器。

我虽然极力主张建成一台加速器，但是心里对技术挑战、经费和时间计划也非常没底。方先生鼓励我，要敢闯敢干，不畏困难。他不仅给予我极大鼓励和鞭策，坚定了我的信心，还具体提出新颖的技术路线来节省经费和时间。国际上的惯例技术路线是先建造一台铝模型，验证设计、调场方法与加工工艺。方先生认为这些国际经验

是否值得学习要看具体情况，他指出，我们不需要用铝模型验证设计，因为现在的三维射频场软件模拟精度已经很高，我已经在意大利核物理研究院工作期间开发出调场软件，并在意大利的铝模型上反复试验，校核过其正确性和有效性。从加工工艺的角度看，铝材质的加工工艺流程和质量与真正要使用的高导无氧铜差异很大，铝模型无法验证，对此我们仅需要一小段无氧铜模型进行加工验证即可。后来按照方先生的思路做，省时省钱又省力，通过短段铜模型的加工，我们发现并解决了加工中的诸多问题，为正式RFQ腔体的加工奠定了一些重要的技术基础。

在RFQ加速器粒子动力学设计上，方先生要求团队精心设计，严格控制束流损失和束流发射度的增长。为此，我们不照搬国际上通行设计思路，融会贯通各家设计方法，取其优点，集成创新。从场分布对误差微扰的敏感度来说，它正比于加速器长度的平方，为提高束流能量，必须加长加速器以达到设计能量。降低误差敏感度的办法是将射频腔体一分为二，再通过耦合单元的电容将两腔耦合为一个腔。但是，这个耦合点的场跃变会引起束流发射度的增长。我们采用两个不同的动力学设计软件混合设计，把耦合点定位在束流跨越时电场为零处，从而避免了耦合缝引起的束流发射度增长。

RFQ腔体的机械加工，在2001年时对中国来



图1 方守贤先生在实验室检查测量工作(左：方先生，中：作者，右：欧阳华甫)

说还是很大的一个技术挑战，我们跑了几十个厂家，仔细交流后都不愿意承担这项任务，没有信心能做好。主要是因为RFQ电极形状曲面复杂，上百个周期，每个都随着粒子速度变化，精度要求又很高。我将无厂家承担的情况汇报给方先生，他说上海有家加速器部件生产厂家，但是这家也不愿意承接，因为他们以前只是做加速器的磁铁，从来没接触过射频加速腔体这样复杂精细的加工。但是没办法，找不着人，于是方先生“势大压人”，非要厂家承接此任务不可，最终老总无可奈何地“服从”了方先生的“命令”。虽然很勉强，但是该厂敢肯硬骨头，最终不仅拿下我们的任务，现在已为国内几家实验室加工了多台RFQ加速器，还蜚声海外，为美国的大型加速器工程放射性束重离子装置(FRIB)加工了RFQ加速器腔体。可见，俗话说得好：人的能力都是逼出来。

其实，这台RFQ的加工经历了诸多曲折，技术上的挑战和难关一一攻克后，等着我们的还有时间计划的难题。当时，RFQ加工所需的大型五轴联动数控铣床在国内很少有，一般都在军工企业。为我们做最后精加工的企业军工型号产品任务十分繁重，再加上我们的加工难度大，容易出错，一些师傅能躲就躲，导致加工断断续续，只能见缝插针。眼看就无法按时完成任务了，但又无法说服他们，也没有更多的经费可以补偿。在一次会议上，我汇报了此情况，王乃彦院士说，他可以介绍国防科工委的领导协调此事。吃完午



图2 方守贤先生视察CSNS直线加速器(右:方先生,中:王九庆,左:作者)

饭，方守贤先生顾不得休息，叫上我急匆匆地赶去国防科工委，向领导汇报了我们项目的重要意义和遇到的困难，领导向方先生表示，马上指示该企业的上级主管部门，加紧完成我们的加工任务。为落实此事，方先生又亲自到位于上海远郊的这家企业，受到企业领导的热忱欢迎，他还下到车间，慰问了加工师傅们，给他们鼓劲。此后，企业上上下下都高度重视我们的加工任务，确保按时交货。RFQ腔体加工虽然给厂家出了一大难题，但通过加工我们的RFQ，这家企业的加工能力得到提升，复杂曲面的测量方法和精度有了改进，进而提升了军工产品的质量。所以，加速器等高能物理装置有时候看起来虽然不能直接贡献于国民经济，但是其超过现有工艺水平的要求，却能推动技术能力的不断突破，然后再为国民经济的提质增效服务。

历经4年的努力，我们终于完成了RFQ加速器的研制，开始最后的调试。方守贤先生十分关心调试情况，他经常来到实验室检查测量结果(图1)。当时我们正在用矢量网络分析仪测量RFQ腔体的场分布，并采用自己开发的分析软件，计算场分布和调整场分布。经反复调试后，场分布达到令人满意的设计指标。最后，我国首台强流质子RFQ加速器建成，主要技术指标仅次于美国Los Alamos国家实验室那台投资上亿美元的RFQ装置，填补了我国强流RFQ加速器的技术空白。

得益于开拓出来的技术基础，在建设我国“十二五”规划项目中国散裂中子源(CSNS)时，我们仅仅用了一年多点的时间就完成了RFQ腔体的加工制造。2018年8月，参加CSNS工程国家验收会时，方守贤先生来到位于东莞的散裂中子源园区，在直线加速器隧道详细询问了RFQ加速器的调试和运行情况，尔后他竖起了大拇指，对我们的工作给予了充分地肯定和赞许(图2)。

除了ADS加速器低能端的核心技术外，方守贤先生还全面部署了其后续中能加速段的核心技术研发。他在中国科学院“知识创新工程项目”380万元经费支持下，于2000年6月在高能所启动了中-低 $\beta$ 超导腔的开发，分别研制出了1.3 GHz和700 MHz/ $\beta=0.45$ 的纯铌椭球超导腔，进行了表面

处理和垂直测量，并建设了我国首个加速器超导腔实验室。20年后的今天，中国超导质子加速器的发展正方兴未艾，全面展开，更使我们无限缅怀方先生高瞻远瞩的战略眼光，衷心感谢他为后人铺设的技术基础。

现在，在广东惠州工地上，ADS工程作为国

家“十二五”规划项目，正在热火朝天的开工建设。这将是国际上首台ADS验证装置，引领ADS研究的国际前沿。它的强流质子直线加速器由RFQ和超导加速腔构成。如果方先生在天有灵，能听到工地隆隆的破土声，他一定会倍感欣慰，静静地等待着这台装置的建设成功……

## 忆恩师 自难忘

王生<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 东莞分部 东莞 523803)

2020-04-14收到

<sup>†</sup> email: wangs@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20200505

2020年1月19日上午，敬爱的方守贤先生永远离开了我们。从2019年3月初入院，方先生与病魔顽强抗争了近一年时间，虽然已87岁高龄，但入院前身体非常健旺，这让亲人和同事们更不容易接受方先生离去的事实。2019年春节，大概是方先生住院前两个月，我和秦庆去家里给他拜年，那时候方先生身体已稍感不适，但他毫不在意，谈兴甚浓，说话依然声音洪亮，兴致勃勃谈了很多工作上的事，包括质子治疗的新理论、新想法。没想到，这是和方先生的最后一次畅谈。当时在医院送了方先生最后一程，令我稍感安慰，但每每回忆起来，那一刻也常会引发无尽的哀思。最近常常回忆起和方先生在一起的点点滴滴，整理成文，聊表对先生的思念，于我个人，也是一个珍贵的回忆。

### 初识方先生

第一次见到方守贤先生，还是在我读博士期间，也是因为这个机缘巧合，我博士毕业后来到中国科学院高能物理研究所做博士后并留所工作，开始了和方先生二十几年的师生情缘。那是在1995年9月底，我去北京顺义参加中国粒子加速器学会第一届“希望杯”青年优秀论文评选会。当时我正在中国原子能科学研究院读研，博士三年级，博士论文主要工作已告一段落，又临

近国庆假期，心情相当轻松。记得是会议第一天，我到餐厅吃早餐，刚坐下，一位知识分子模样的中年人也在同一张桌子坐了下来。可能是看我像学生，问我是不是来参加“希望杯”的，我俩很随意的边吃边聊，了解到我马上博士毕业，他详细并且很专业地询问了我论文工作情况，并问了我毕业后的打算，得知我还没有确定去向，就说：“来我这里做博士后吧！”，我很诧异地问了一句：“老师您是？”“我是方守贤。”听到方先生这一句简单的回答，我顿时有些石化，对于加速器领域的人，这是一个如雷贯耳的名字，没想到是以这样的方式结识了方先生。方先生很和蔼，跟我简单谈了今后可能的研究方向。面对偶像级的人物，我一时有些紧张了。虽然只回答说会认真考虑，但直觉告诉我，我不会放弃这个机会。算来那时方先生也已经快六十岁了，但看上去也就是不到五十的样子，精力充沛，气宇不凡。一晃二十几年过去了，初识方先生的一幕仿佛就在昨日。

20世纪90年代初，国际上加速器驱动次临界装置(ADS)成为一个热点研究方向，方守贤先生和丁大钊先生注意到这个方向未来对国家核能发展的重要战略意义，开始推动国内开展相关的研究工作，并于1995年底，联合高能所和原子能院相关研究人员组成了课题组，开展了系列的学术活动。那时我在准备毕业论文之余，正好可以抽