高能加速器磁铁电源探索 40 载 ——徐中雄研究员访谈录

王大洲, 宋林柯

(中国科学院大学 人文学院, 北京 100049)

摘要: 本文是中国科协资助项目“北京正负电子对撞机工程创新团队学术成长资料采集项目”系列访谈之一, 根据中国科学院高能物理研究所研究员徐中雄先生口述资料整理。从求学哈军工、九院岁月、入职高能所、访学康奈尔、担任磁铁电源组组长、担任 BEPCII 副总工程师、突破快循环同步加速器磁铁电源技术、心系人才等八个方面, 再现了徐中雄先生的学术生涯特别是 40 多年来伴随北京正负电子对撞机、上海光源和中国散裂中子源的建设, 不断探索高能加速器磁铁电源的奋斗历程, 由此从我国高能加速器创新发展的一个侧面揭示了大科学工程作为技术创新源和人才培养摇篮的特殊功能。

关键词: 徐中雄; 北京正负电子对撞机; 中国散裂中子源; 磁铁电源

中图分类号: N09 ; TL5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2020)02-0192-18

访问整理者按: 受访人徐中雄, 1943 年生于北京, 祖籍河北省玉田, 中国科学院高能物理研究所研究员。1961 年进入哈尔滨军事工程学院原子工程系学习。1978 年到中国科学院高能物理研究所任职, 主要从事高能加速器磁铁电源及控制器设计研制和运行等工作。1998 年晋升研究员, 任博士生导师。1984~1985 年和 1990~1991 年两次赴美国康奈尔大学访学, 从事加速器 CESR 的多项设备设计研制和运行工作。1985 年参加北京正负电子对撞机 (BEPC) 项目磁铁电源系统设计研制、建造和运行工作。1991~1998 年任 BEPC 磁铁电源组组长。1998~2000 年, 担任上海同步辐射光源预研项目磁铁电源系统负责人。2002~2010 年担任北京正负电子对撞机升级改造工

程 (BEPCII) 副总工程师, 并兼任中国散裂中子源 (CSNS) 可行性调研阶段分系统负责人。2006~2013 年兼任 CSNS 预研阶段电气总工程师 (代理), 在快循环同步加速器磁铁电源技术上取得突破性成果。2010~2016 年担任高能物理研究所大科学装置管理中心和加速器中心顾问。2011 年 1 月 16 日, 北京正负电子对撞机重大改造工程 (BEPCII) 研究集体获得中国科学院杰出科技成就奖, 2017 年获得国家科技进步集体一等奖, 徐中雄是主要完成人之一。

受访人: 徐中雄

访谈整理人: 王大洲, 宋林柯

采访时间: 2019 年 5 月 16 日

采访地点: 中国科学院高能物理研究所主楼 413 会议室

1 求学哈军工

王大洲 (以下简称王): 徐老师您好! 很高兴

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-03-10

基金项目: 老科学家学术成长资料采集工程项目“北京正负电子对撞机工程创新团队学术成长资料采集”(CJGC2018-QT-XH10)

作者简介: 王大洲 (1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 工程哲学与工程史。E-mail: dzwang@ucas.edu.cn

宋林柯 (1993-), 女, 博士研究生, 研究方向: 工程哲学与工程史。E-mail: songlinke181@mails.ucas.ac.cn

您能接受我们的访谈。我们打算围绕北京正负电子撞机建设、运行、改造,直到今天高能物理研究所在广东东莞建立分部的整个历程展开。在这个过程中,您从科研新兵成长为科研骨干,最后成为高层管理者之一,我们很想了解您的学术成长历程和经验体会。首先想问您,当年您为什么报考哈尔滨军事工程学院(以下简称哈军工)?

徐中雄(以下简称徐):我在上中学的时候,喜欢看一些科技杂志,对物理特别是原子物理感兴趣。那个时候还不知道粒子物理、高能物理这些名词,这些都是后来才有的,我只知道原子物理。当时我的第一志愿是报考清华大学工程物理系,据我了解,这个系的专业就是原子工程。志愿填完不久,突然接到学校通知,把我保送到哈军工。这是我国第一个高等军事技术院校。抗美援朝时,我国军事工程技术和武器装备还很落后,虽然打胜了,但损失很大。为了振兴国防工程,经党中央和毛主席批准,建了这么一所学校。1961年我们入学那年,哈军工设立了原子工程系和导弹工程系。当时哈军工各个系的专业还是保密的,新生并不了解,读哪个系都是分配的。在分配之前,新生队队长征求一些同学的意见,其中就有我。我大学第一志愿填的是清华的工程物理系,第二个是北航的自动控制系,所以我希望搞原子工程或者武器自控这两个专业。后来分配的时候,同班的几个同学都分到别的系了,就我一个人被分到原子工程系,正好符合我的志愿。不过当时对这个专业的理解是很肤浅的。

王:请您谈谈哈军工的培养模式?

徐:哈军工的要求很高,我们虽然是学工程物理

专业,但数学基础要打牢,数学课程跟北大数学系前两年是一样的,所以比在一般大学学得更广更深一些。此外,当时建校时学制定的是五年,而许多大学是四年制。所以课程也要比一般大学内容多,可以说是理工兼备,基础物理、基础数学和专业的工程课程都设置很多,一共四五十门。这一套教学体系是直接来自苏联移植过来的,尤其是导弹和原子工程系,当时我国在这方面几乎是空白。学校有一个苏联顾问团,对哈军工教学指导意见有很大权威,并且得到陈赓院长的大力支持。第一任苏联顾问团的团长和空军系的主任是苏联军事学院的同学。当然也参考了北大、清华等国内名校的教学内容,钱学森先生也多次来校指导教学工作。当时很多老教授是从美国留学回来的,有的是从清华、北大等名校抽调来的,包括我们系的副主任朱起鹤教授,也有很多留苏的老师,例如教我们无线电课程、脉冲技术课程的老师。苏联专家主要做顾问(例如建系、学制等),不直接教课,讲课都是我们自己的老师。^[1]

王:您在哈军工五年学习情况怎样?

徐:实际我们在校时间是五年多。那时候我们这个专业毕业生正好赶上国家核试验高潮,所以急需我们参加工作。快毕业的时候,也就是1965年底,学校接到命令,要求我们提前毕业,不在校内做论文了。但不久后情况又发生了变化,由于文化大革命等各方面的原因,1966年4月通知我们暂时不去基地了,因此就继续留校待了半年补习英语。我们大学五年和高中时期学的都是俄语课,平常看的资料都是俄文,为了提高俄语能力,我的一些上课笔记是俄文写的,可是当我们毕业之后接触的资料全是英文,俄文资料一个没

陈赓(1903-1961),湖南湘乡人,中国工农红军及中国人民解放军主要领导人之一,军事家、中国人民解放军大将。1952年,被委以重任,领导创建了中国人民解放军军事工程学院(哈军工)。

朱起鹤(1924-),北京人,分子反应动力学家,中国科学院院士。1947年毕业于南京中央大学,先后在燕京大学、北京大学化学系、哈尔滨军事工程学院和长沙国防科技大学工作,主要从事化学与物理教学和国防科研工作,先后研制成6台高水平的大型分子束实验装置,并开展了分子和团簇的激光光解、光电离和分子的超快过程等反应动力学研究,取得具有创新性的研究成果。

有。当时钱三强 到学校去了,要求我们留在学校 恶补了半年英语。

2 九院岁月

王: 毕业之后,您从事什么工作?

徐: 毕业之后我们没有什么自己的意向,我是被分配到国防科委第九研究院。现在的九院都集中建在绵阳城了,我们去的时候是在山沟里,环境很艰苦,我们一边建自己的实验室,一边学习,还要参加文化大革命的那些批斗。那里山很高,我们住的房,躺在床上看着对面的天空,九点钟以后才能见太阳,有时粮食运不进去,吃的大米稀饭,没什么菜,就把榨菜皮子都吃了。九院的基地建设我也参加了,那会儿按文化大革命的要求还要建“干打垒”的房子,房子下层大概一人高全是石头,每块石头是一米多长的条石,重四、五百斤,由四个人从山上抬下来装到山坡底下的卡车上,一干就是一天,粮食也少,肩膀都压肿了,但是我们情绪非常高昂。这个干了有半年。在这之前,还有一个基础锻炼,就是知识分子要接受工人阶级再教育,我当时被下发到包钢

当了一年工人。头两年做炼铁工人,然后回来盖房子,边盖房子边搞业务。当时生活就没法儿说了,蚊虫咬,吃不饱。

王: 您当时没有做专业的工作?

徐: 有,干了一些。当时九院算是受冲击最小了,有的科研单位都解散了。九院是周总理力保的。但是在那种情况下有很多有名的科学家受到迫害,例如王淦昌 先生曾下放到研究所接受批判。我有很多很敬重的老师,像俞大光(《电工基础》教科书作者),当时被手铐铐着挨斗。唐孝威 是王淦昌的学生,研究爆炸物理的,文革期间九院搞清队运动,说他是苏联特务,当时就要被枪毙了,就搞到这种程度!唐孝威文革后期得到平反,也调到高能所工作过,后来任浙江大学教授、副校长并当选中国科学院院士。文革期间对知名科学家和一般的科研人员在政治上的压制和迫害是很厉害的。

王: 您当时是什么心态?

徐: 在九院我们是刚分配来的学生,参与的政治运动少一些。我们就是基础群众,喊喊口号什么的,不久就被下放到包钢接受再教育了,以

钱三强(1913-1992),浙江湖州人,核物理学家,"两弹一星"元勋,中国科学院院士。1936年毕业于清华大学。1940年获法国国家博士学位。1946年获法国科学院亨利·德巴微物理学奖。1948年回国后,历任清华大学物理系教授,中国科学院副院长兼浙江大学校长,中国科协副主席、名誉主席,中国物理学会副理事长、理事长。在核物理研究中发现了重原子核三分裂、四分裂现象,并为中国原子能科学事业的创立、发展和“两弹”研制做出了突出贡献。

国防科委于1958年10月16日成立,称国防部国防科学技术委员会,下辖若干个研究院所。国防工业第9研究院(核武器研究院,现工程物理研究院)1961年8月成立,位于四川绵阳,属国防部建制。1965年1月划归二机部。

干打垒是一种简易的筑墙方法,在两块固定的木板中间填入黏土并夯实成墙,用以盖房。

包钢是包头钢铁(集团)有限责任公司简称,是中华人民共和国成立后最早建设的钢铁工业基地之一,1954年开始建设,1959年投产,是世界上最大的稀土科研、生产基地。

王淦昌(1907-1998),江苏常熟人,核物理学家,"两弹一星功勋奖章"获得者,中国科学院院士。1929年毕业于清华大学物理系。1933年获柏林大学博士学位。1964年,独立提出了用激光打靶实现核聚变的设想,是世界激光惯性约束核聚变理论和研究的创始人之一。他参与了中国原子弹、氢弹原理突破及核武器研制的试验研究和组织领导,是中国核武器研制的主要奠基人之一。

俞大光(1921-2017),辽宁营口人,理论电工和电子工程专家,中国工程院院士。1944年武汉大学工学院电机系毕业,留校任教。1953年哈尔滨工业大学研究班毕业。曾任中国工程物理研究院副院长,科技委副主任。在核武器引爆控制方面,采用过载延时引信,提高了引爆的可靠度。在核武器再入遥测技术中,采用S波段脉位键控调制方案,获得了良好结果。曾担任国家某型号核武器总体设计师并完成定型工作。

唐孝威(1931-),江苏太仓人,原子核物理及高能物理学家,中国科学院院士。1952年毕业于清华大学物理系。先后在中国科学院近代物理研究所、北京二机部原子能研究所、苏联杜布纳联合原子核研究所、核工业部九院(现中国工程物理研究院)、中国科学院高能物理研究所等单位工作。2001年起,任浙江大学物理系教授,创建交叉学科实验室,在脑功能成像、神经信息学等前沿领域开展多学科交叉研究。

劳动为主。由包钢回到研究所后, 看到这紧张的政治气氛, 心里压力很大。但学生嘛, 说话也比较随便, 还不知道政治运动的厉害。我当时也受到了一次批判。那时住房很简陋, 物质供应缺乏, 在深山沟里, 老职工有小孩了, 买不着鸡蛋, 就养一些鸡鸭, 军管会去了之后说这是搞资本主义, 鸡鸭都要杀掉。我们住房附近职工养的公鸡, 天不明就叫了, 把我们吵得够呛。当时要杀鸡, 我说这回好了, 咱们搞一个“三光”(意思是鸡、鸭、鹅都杀光), 早上可以睡好觉了。这句话被人听到了, 说我把军管会的杀鸡命令污蔑为当年日本鬼子屠杀中国百姓的“三光政策”, 就拿出来批判我, 在大会上点了我好几次名, 我就不敢说话了。我那时有点时间就看书, 我的组长是成都电信工程学院毕业的, 是业务尖子, 他很欣赏我, 经常鼓励我, 给我讲一些具体技术问题的想法。我在那儿干了几年, 实在受不了这种政治环境, 它几乎把我上哈军工时的理想抱负都给打掉了。那时候周总理知道九院情况之后, 指导了纠偏平反工作, 可以照顾一部分人调动工作。当时我已结婚了, 爱人在北京东方红炼油厂, 所以我就借机会通过她的介绍从九院调出来了。

王: 您调到哪里了, 从事哪些工作?

徐: 1974 年初就离开了, 去了北京燕山石化公司的东风化工厂, 具体在自动化仪表车间当技术员。那和我学的专业有些距离, 但我学的专业里面有很多电的和自动控制的专业成分, 所以也算有关系。我上中学的时候爱搞无线电, 我们有个无线电小组, 我也搞出点小成绩, 自己做成过录音机, 里面的小元件、磁带都自己做。我虽然学的是核物理专业, 但那会儿对电专业课有点兴趣。在哈军工我们有一门脉冲技术课程(这是数字电路和计算机技术的基础课), 我学得不错。四年级的时候, 我所有功课都是 5 分, 其中脉冲技术是我学得最好的一门课程, 所以我后来在电方面做了不少工作。

3 入职高能所

王: 那您怎么到高能所工作的?

徐: 1978 年我到高能所, 是通过张莹祥前辈介绍的, 她是个老科学家, 很可惜, 她今年去世了。我被分配到高能所加速器部门, 当时磁铁电源组需要人, 我就被安排到这个组, 组长是一个学电真空专业的老同志。我想我脱离科研工作这么多年, 一直在工厂, 能有这机会不容易, 无论哪个专业, 只要在科研单位, 而且大背景是粒子物理的应用平台或实验平台, 我就愿意专心致志去搞, 所以这么多年也就没有再改行。

王: 那请您谈谈张莹祥前辈。

徐: 她是我的长辈, 是我父辈的朋友了, 她的爱人和我父亲是同事, 我父亲比他们大十几岁。他们老两口都是清华毕业的, 是解放前的地下党员。她是一个高频技术专家, 原在北京广播器材厂工作, 上世纪五十年代作为专家援助过越南。在高能所准备建造高能加速器的初期, 国家为了把这个工程搞好, 通过周总理批示, 由中组部出面从全国各地抽调一些专家, 她是其中之一。我们两家住在同一个大院, 她技术水平很高, 和我也有些交流, 知道我对技术比较专注。后来高能所要建高能加速器需要人, 就介绍我来了。高能所在建造第一个质子直线加速器的时候, 她是那个室的副主任, 但是因为已经接近建成了, 她那里并不需要人, 所以我就来到环形加速器磁铁电源组了。

王: 原来您在工厂, 现在到了科研部门工作, 环境很不一样。您是如何快速适应新的工作环境的?

徐: 的确很不一样, 因为赶上文化大革命, 科研工作九院并没有打下太多的基础, 但是在工厂的四、五年并没有白费。在工厂我是搞仪表和自动控制的, 牵涉到电子学, 我比较喜欢这个, 所以钻研得比较深, 而且我参与了当时新型仪表的定型考核工作, 也抓紧时间学了一些计算机技

术, 后来我当了技术组组长了, 在这种情况下厂里是不想放我的。我千方百计给他们讲, 我原来是科研单位的, 我还要回到科研单位去, 那里加速器要上马了, 是邓小平同志亲自抓的项目, 很需要人, 后来拿了周总理关于高能加速器的批示给他们看, 才放我过来了。有这样一个机会, 我当然很珍惜。我在工厂也有技术成果, 两项技术发明。当时我们进口的涡轮透平空气压缩机, 高速转动过程中要求不能有大的轴向移动, 否则就会击碎涡轮叶片, 具体指标是假如有一个毫米以上的轴向移动, 监测系统就会报警。可是不知什么原因我们厂的透平机没有配备这套件监测设备, 需要工厂自行设计研制。当时工厂没有这方面的技术人员, 车间主任找到我说, 老徐, 你能不能想想办法? 我根据掌握的基础知识进行了调研和设计, 到电机车间找了一些矽钢片材料, 请他们按我的图纸裁剪矽钢片, 叠压磁芯, 我自己做线圈和电子线路, 配备一些通用自控仪表, 最后做成了“轴向位移监测器”, 正式投入了生产运行。后来直到我调离工厂, 那套设备一直用着。这不是实验室试验品, 是工业用的实用设备, 因为透平机要损坏了是上百万的。投运之前, 我十几天都没怎么睡觉, 担心一旦不成功怎么办。这个透平机要是碎了, 都是我的责任, 那时候文化大革命刚结束, 对知识分子的偏见还是很大的, 只许成功不许失败, 失败了那就是反革命, 所以我会学习的压力。但我不甘于只做这个, 所以晚上我还是坚持复习高等数学、物理、外语等, 在工厂的时候没停过, 后来到高能所后, 并没有

觉得费劲。当时高能所不是建正负电子对撞机(BEPC), 而是要在北郊那儿建一个质子加速器。质子加速器磁铁电流要求精度是万分之一以上, 要有一个直流传感器要把它测出来。我当时就负责研制 6000 安培的直流电流精密测试传感器(DCCT), 测量精度达到万分之一以上。这个任务很重要, 因为如果精度达不到, 粒子在加速器管道里面循环时轨道精度就没法保证, 能量也没法保证。当时我所在的磁铁电源组组长是电真空专家, 其他主要科研人员都是物理专业, 较比组内这些同事我在电子学和电磁技术方面比较擅长一些, 因此实际研制过程以我为主。刚刚进入科学院我压力也很大, 不能失败, 最后经过一年多努力也干成了。但是这个技术成果按资排辈, 主要算作课题组组长的。当然我也没有什么怨言, 能做这个事情就很高兴了。当时组长到费米实验室考察, 带回来图纸, 所以我不是白手起家, 有图纸参考, 还有一套进口磁芯。但是要把它做出来, 还是很难。因为我用的电子器件, 半导体集成放大器都是国产的, 其中一些性能指标达不到美国器件的水平, 而且图纸全是外文, 没什么其他参考资料, 所以要靠自己做。从 1978 到 1979 年, 我们把它做出来了, 也通过鉴定了。这是我来到这边完成的第一件事, 之后就转到研制电源控制器课题了。

王: 请您谈谈电源控制器研制的具体过程。

徐: 加速器磁铁形成的磁场, 不是靠一种磁铁, 而是有四极铁、二极铁, 还有校正铁等, 这些磁铁都是由电源供给精密的激励电流, 各台电

1975 年初, 中科院上报建造 40GeV 质子同步加速器的方案, 约需经费 4 亿元, 计划在 10 年内建成, 1975 年 3 月周恩来总理和邓小平同志批准了这一方案, 代号为“七五三工程”, 但未能实施。1977 年, 中科院上报《关于加快建设高能物理实验中心的请示报告》, 计划分三个步骤建设高能物理实验中心: 第一步, 在 1982 年底建成 30GeV 强流质子同步加速器; 第二步, 到 1987 年建成 400GeV 质子同步加速器, 其规模可与西欧核子研究中心(CERN)的 400GeV 超级同步加速器相比; 第三步, 到 20 世纪末建成世界第一流的高能物理实验中心。该质子加速器项目简称“八七工程”, 1977 年 11 月 15 日获邓小平等国家领导人批准, 后因为方案超越国力而下马。

费米国家加速器实验室是美国最重要的物理学研究中心之一, 始建于 1967 年, 隶属美国能源部, 以诺贝尔物理学奖得主恩利克·费米(Enrico Fermi)的名字命名。费米实验室的质子/反质子加速器是目前世界上能量输出第二高的粒子加速器。

源运行是要同步的,而且各磁铁运行电流之间要始终保持严格的函数关系,这一技术要求要由中央控制计算机通过磁铁电源的本地控制接口来实现。电源的控制接口的一个核心部件是数字到模拟量的转换器(DAC),然后是磁铁电流运行曲线函数的传输与存储,需要配置远程控制通讯接口等。这个硬件由我来做,花了很长时间,做成一个模型,编写了一套调试程序,但是没用上。因为那个质子加速器整体项目没干下去。为了这个项目,我还学了单片机,那个时候控制系统使用单片机处于开发阶段。我到北京工业大学计算机系培训三个月,学了单片机的一些基本知识,回来以后,我就以这个为控制主体搞起来了。有一个老科学家,即我们室主任徐建铭,比较欣赏我。当时北京正负电子对撞机项目需要人,他建议我出国学习,为对撞机建造做准备。所以,1983年所里派我到康奈尔大学物理系威尔逊加速器(CESR)实验室学习,做访问学者。

4 访学康奈尔

王:能到康奈尔大学进行访问研究,当时很难得啊。

徐:是的。那时康奈尔大学是很保守的学校,黑人学生和亚洲人很少。我是那个实验室的第一个中国访问学者,实验室给我开了欢迎会。一些美国同事曾问过我,“你住在北京,可以任意到其他城市和乡村旅行吗?”可见这个学校的美国人对中国了解甚少,知道的大概是来自西方媒体有偏见的报道。在国内我做完了磁铁电源控制接口模型,但到康奈尔一看,这个控制接口的一些部件他们有现成的芯片,用起来简单多了,可见当时我们信息有多闭塞。你之前特别问到一个问题,

哪个科学家对我影响较大?就是徐建铭先生。他是清华电机系毕业的,清华大学加速器技术理论这门课的教材就是他编写的,老先生在学术上非常好,对年轻人培养很用心。那时候,因为我做这两个课题引起他注意了,他就把我送出去了。在这以前,出国都是集体出去多,很少有单个去的,我在1983年一个人去康奈尔大学实验室,一直在那儿待了一年三个月。在去之前我做了很多准备。我没有学过加速器物理,徐先生就给我找了一个老师补习加速器物理,这个老师刚好是我哈军工的老师,叫冯宝树。他当时是我们加速器物理组总体设计人员,学问很好,基础理论很棒。他给我讲加速器物理,把他写的讲义给我拿过来,把数学公式从头推到尾,这是非常重要的。这也是徐先生为培养我,对我学术上进步影响最大的一件事情。就这样我把加速器物理基础给补上了。那时候在高能所,各个专业交流是很少的,能有这样的机会不容易。

王:这样啊,那请您进一步解释一下交流少的问题。

徐:80年代初,有一些老的学术作风还是不好的,各方不交流,是一种“小农经济”氛围。有的人看什么参考书和资料都不让你知道。当我到了康奈尔大学就感受到一种非常开放的学术气氛,那里的加速器实验室不分电源、磁铁、高频、物理等专业组,有什么项目你干什么项目,同时可申请参加多个课题组,这样我对加速器整体了解得就比较多。当时这在国内是不行的。

王:您在康奈尔做了哪些课题?

徐:当时做的第一个课题不是磁铁电源主机,而是电源控制器接口(在我们所这属于自动控制

徐建铭(1925-),河北保定人,加速器物理学家,1951年毕业于清华大学电机系,后任中国科学院高能物理研究所研究员,参加了我国第一、二台静电加速器的研制与运行工作以及40GeV和50GeV质子同步加速器设计和研究的组织工作,负责了北京正负电子对撞机工程储存环的研制工作。

冯宝树(1931-),北京人,1953年毕业于北京大学物理系,之后任教于哈尔滨军事工程学院,后调入高能物理研究所从事环型加速器束流动力学理论方面工作,1985年到北方工业大学任教。

组课题),课题不是很大,我也有国内的工作基础。当时美国新出了一个器件,是18位DAC数模变换器,对中国禁运,我的合作导师要求我用这个器件替换原来控制器中的16位DAC,我设计了外围寄存器等线路,修改了控制板,就把它做出来了,投入了运行。与此同时,我也花了比较多的精力调研CESR开关型四极磁铁电源的工作原理和工艺结构,得到了一套宝贵的电源图纸。第二个是设计和研制一种加速器束流探测(在我们所这是束流测试组的业务范畴),需要把加速器中运行的电子束团截面实时测出来,作为加速器运行调束的一个判据。这个题目涉及的专业内容比较广,为了选择测试方案我进行了大量调研。首先是计算在测试位置的常规运行条件下束团截面尺寸,计算在不稳定情况下束团尺寸和运行轨道的变化范围,这需要一些加速器束流动力学知识和计算工作。其次是束团光斑引出光路的设计,这里面需要一些基本光学知识和机械知识;最后是选择传感器类型。美国的资料很全,不懂的问题我就找有关教授和科研人员咨询和讨论,受益匪浅。当时美国有一种新出现不久的元件,叫电荷耦合器CCD。我觉得这是一个方向,也得到合作导师的支持,就确定了这个方案,我花了半年时间研制出CCD型束流截面探测器的实验装置。^[2]现在CCD器件很普遍了,咱们现在摄像头有CCD型的,但那时候美国的CCD也刚开始出现不久,是一维的,现在咱们都用二维的了。我回国后由CESR其他人进一步制成实用设备,投入运行。后来他们的教授感谢我把这个CCD技术引进到束流探测。我把这个成果写了篇文章以便国内BEPV参考,回来汇报给徐先生,徐先生就给所里报告了。想不到当时有人说徐中雄这个手伸得太长了,怎么搞起束流探测组的课题了?

王:这反映出当时国内的科研文化和康奈尔截然不同。

徐:我感觉完全是两种风气。在康奈尔,你有问题,不必顾忌各种专业组的界限,可以找任何一个教授和专家交流。我在出国之前努力学英语,就派上用场了,英语提高比较快,专业方面也很快能畅通交流了,所以有任何技术上的困难我都可以找他们问,人家都会无保留地同我交流意见。人家出的十个主意可能九个都不合用,但有可能某句话对我特别有用,思想活跃极了。

王:是啊,这才是创新文化。

徐:对。所以我后来带学生以及与同事交流的时候,受这方面的影响很大。我是1985年3月回国的,四年后的1989年,康奈尔加速器实验室再次邀请我过去,又在那儿待了一年多。这时候,我的工作范围就更广了,只要加速器领域的工作他们都愿意同我讨论,我还向大家报告了北京正负电子对撞机结构和基本参数及运行状况。因为我是熟人了,只要需要我就去做,当时正在进行CESR-C的升级改造工程,我的第一个任务是设计电子枪的高压屏蔽仓。

王:那请您具体谈谈这个任务?

徐:过去我接触的都是低压或弱电电子学工作,没有搞过高压电专业,这个课题是搞高压的,还得有机械制图基本技能。幸亏我学过机械制图,这也是哈军工学科设得多的好处。但是美国的制图规则与国内不一样,咱们左视图在右,右视图在左。他们左视图就是图纸左侧,右就是右,上就上,下就是下,和我们是相反的。起初我对此并不了解,我按照中国制图规则画出来,和那里的工程师沟通,这位工程师很包容,说他看明白了就行,可以找工人加工了。我看到的美国科学家是这样的:一个是广泛交流,一个是亲自动手,大牌教授也如此。那里实验室有一个加工车间,好多东西都是我自己动手做的,例如自己动手切割光学镜片,加工和组装光路支架。我这次访问期间,第二个课题是加速器真空部件纵向阻抗研

究, 当时是加速器科研前沿课题。谢家麟先生到美国 BNL 国家实验室去访问, 得知我正在做纵向阻抗研究的课题时, 专门打电话过来, 说明这一课题的重要性, 鼓励我努力做好。在研究基础上我同美国一个同事合作开发了低纵向阻抗静电分离器, 并发表了论文。我还每周参加一次加速器的运行值班和调束工作, 交流比较广泛一些, 所以对加速器各个领域的专业知识都有了一些。这就为我以后能担当总师工作打下了比较好的基础。

5 担任磁铁电源组组长

王: 您 1983 年底到康奈尔, 1985 年北京正负电子对撞机开工的时候您回来了。那时候国内的学术风气变了吗?

徐: 我回来就参加磁铁电源系统建造工作。建成之后, 去搞运行, 后来当副组长, 1990 年我第二次出国回来不久就当了磁铁电源组组长, 1999 年初卸任, 前后大致八、九年时间。第一个加速器建设时期一些人还是有些保守的, 一些承担课题的老同志, 有小农经济思想, 在大科学工程面前必然受到冲击, 产生矛盾, 闹人事纠纷, 我听过高能所领导在大会上对此做过批评。第一次从康奈尔回国后, 我也不满意这种风气, 有什么问题大家在会上交流, 有问题随时报告, 交流技术, 有利于工程进展, 也利于培养年轻人。起初其他组不太适应我这个情况, 但是我还是经常和他们交流。随着 BEPC 工程进展的要求, 整个科研风气也有了改进和提高, 保守的作风慢慢受到一些冲击, 技术交流压力和阻力也就小了, 到 BEPC 运行时期, 高能所学术风气和工作作风明显好转了。例如, 1990 年我第二次出国访问回来

后, 在加速器中心报告了 CESR 纵向阻抗的研究课题, 受到各级领导的重视, 在加速器中心主任赵振堂 (现任上海应用物理所所长) 的主持下成立了 BEPC 纵向阻抗研究课题组, 成员以加速器物理组为主, 我也是其中成员。由各类人员组成专项研究课题组, 这是一个很大的进步, 而这是在工程建设中形成的。可以说, 高能所风气的转变是跟 BEPC 工程直接相关。

王: 北京正负电子对撞机是 1984 年开工, 1988 年首次对撞成功, 基本上是四年的时间。在这一段时间里您主要做了什么?

徐: 1985 年我回来后主要和加速器控制系统人员合作, 负责磁铁电源远程控制接口的设计和制造, 同时参加磁铁电源设备研制和批量建造的协调和监理工作。到后期全力投入到电源设备的测试验收和安装调试工作中。我与中国计量科学院郭允晟等专家合作开发了一套磁铁电源电流巡回检测设备, 这套设备对于提高电源输出电流稳定度精密检测效率, 保证工程验收进度起了关键作用, BEPC 建成后, 这套设备用于磁铁电源系统运行。BEPC 磁铁电源系统总体设计工作并不是我, 那时我正在康奈尔, 总体设计组长是蒋延龄 (1976 年由哈尔滨工业大学调入高能所的老教师), 在那之前的组长沈宝华 (1955 年到科学院工作, 老专家, 1985 年转到加速器真空组当组长) 也参加过一些工作, 并指导我进行了一些 BEPC 磁铁电源系统的早期调研工作。BEPC 的磁铁电源结构都是可控硅型和晶体管线性电源, 虽然概括讲在国内这都是成熟技术, 但是要做到我们要求的 0.01% 输出电流精度, 对于国内生产工厂还是第一次, 当时国内大功率电源产品的输出电流精度不过 1%, 包括电源工艺结构, 加工精度, 高

谢家麟 (1920–2016), 哈尔滨人, 中国科学院院士, 国际著名加速器物理及技术专家, 2011 年度国家最高科学技术奖获得者。1943 年毕业于燕京大学, 1951 年毕业于斯坦福大学并获博士学位, 1955 年冲破重重阻力回到祖国, 先后在中国科学院原子能研究所和高能物理研究所工作, 曾担任高能物理研究所副所长、“八七工程”加速器总设计师、北京正负电子对撞机总设计师和工程经理、粒子加速器学会理事长、高能物理学会副理事长。

精度检测取样部件等都没有相关的经验,需要我们科研人员同厂方交流和共同研究,通过样机研制解决技术难点,最后生产出符合 BEPC 技术要求的电源设备。BEPC 磁铁电源的总体方案是借鉴美国斯坦福实验室的方案,电源的类型各方面也都借鉴他们的。我在康奈尔的时候,对新型磁铁电源技术就很重视了,当时 CESR 的四级磁铁电源是开关型电源。

王:可否请您具体谈谈开关型电源?

徐:开关型电源,就是我们现在用的电源。在第一次访问 CESR 期间,我花了很多时间学习和调研了 CESR 加速器开关型磁铁电源技术,还得到一套完整图纸,并向徐建铭先生做了报告,建议 BEPC 磁铁电源使用开关电源技术。其优点我也讲了,第一是电源效率高,第二控制速度快、精度高,第三稳定度高。开关型电源它不仅是一个传统意义上的电力转换系统,而是使用了快速电子学技术按照特定函数程序控制电力器件开关状态,进行电能转换和传输,该技术属于电力电子专业。这个新技术那时候在我们国家工业领域还没有兴起,当然作为科研单位要有预研的话应该还可以,但是徐先生说我们还是使用成熟技术,所以加速器基本上套用斯坦福实验室的技术,以确保 BEPC 整体建造进度;新技术暂时不用,以后适当时机启动该课题的科研。当时我们开了一个学术报告会,由我向大家介绍了 CESR 开关型磁铁电源技术原理和基本结构。我当了组长以后,一些电源设备不稳定等问题也很明显了,需要更新。鉴于国家整体技术水平也在提升,因此我就主张采用开关型电源取代这些电源,这个头是我提议做的,也得到组内同志的积极支持。具体情况是,1990年我第二次访问康奈尔之前,征得电源组组长蒋延龄同志的同意,使用组内少量运行资金进行开关电源的小型实验研究,我把那套

CESR 的开关电源图纸留给了他,到 CESR 后我得知这个研制工作分配给了组内蔡志国和程健同志。这是我们开关电源实际研制工作的起点。我回国后,因为老电源出现过事故,借此机会改造成开关型电源。我又引进了一些新技术措施,增加了一些联锁保护技术,包括磁铁温度监测系统、电源温度控制系统,快速联锁保护、电缆温度监测等都归到电源组来了,除了电源以外包括了很多其他保护系统在里面。我就做这些工作。

王:90年代您开始做开关电源,实际上是为后面 BEPCII 奠定了基础,因为它已经用到这个电源了,请您谈谈研制电源的过程?

徐:BEPCII 整个电源方案就是按我想法做的,前面说过,我们有 BEPC 时期研究工作基础和初步应用基础,也有上海光源的研制基础。当然电源的研制和生产,离不开国内的电源企业。当时和我们合作的企业或研究所有五六个,北京两家,甘肃天水一家,西安三家,成都一家,这些企业有国营的也有民营的。找这么多企业是因为电源的种类不一样,规模不一样。磁铁有多少种,电源就要多少种。甚至电源要比磁铁多,因为一块磁铁上可能有两种绕组需要不同的激励电流。一些电源还要求输出电流从正到负,从负到正可以连续调节到任何位置,而且调节过程要求按照指定的电流曲线,精密平滑、无间断,否则会使加速器的粒子丢失。磁铁电源对调节控制性能的要求非常高,以前我们国家在这方面是空白,无法生产这么高精度的远程控制可调电源。当时一般的工业应用领域有 1%精度就够了,当我们提出做万分之一高精度电源时,很多厂家摇摇头就不干了。我们答应给研制费,和他们一起做研究,这样就扶持起来了。国外工厂生产的电源我们买不起,也学不到,比如说我去日本高能所参观,人家只简单介绍这是二极磁铁电源,那是四极,

开关电源是利用现代电力电子技术,控制开关管开通和关断的时间比率,维持稳定输出电压的一种电源,开关电源一般由脉冲宽度调制(PWM)控制 IC 和 MOSFET 构成。随着电力电子技术的发展和创新,使得开关电源技术也在不断地创新。目前,开关电源以小型、轻量和高效率的特点被广泛应用几乎所有的电子设备,是当今电子信息产业飞速发展不可缺少的一种电源方式。

那是六极的电源,我说希望打开机柜门看看内部结构,人家不能给开门。再举个例子,像探测器上有一个塑料接头,国外工厂不让外人进去参观生产工艺,很保密的。美国还稍好些,日本绝对不可能,所以,我们电源起步也是很艰难。我们的工厂是希望能少花钱的,但是一些高质量的电子器件和材料都很贵,所以我们在这方面进行监督,通过技术交流,帮助厂方解决质量问题和技术问题,组内同志都做过这方面的工作。

6 担任 BEPCII 副总工程师

王:2002 年对撞机改造工程开工,您就担任了副总工程师,请您谈谈您的工作内容发生了哪些变化。

徐:我那时刚从上海回来。当时 BEPCII 工程需要电器总工程师,后来经刘德康、张闯等同志的推荐,指挥部任命,我担任了整个改造工程的副总工程师。这项工作和过去就不太一样了,需要整体协调,有很多困难。我虽然两次出国,在美国康奈尔加速器实验室接受过几个相关专业的训练,但是高能物理加速器有一个特点,各台加速器是不一样的,不能重复。我们有自己的设计,搞电设备的总师,只要涉及到电专业内容的设备我都要熟悉,这需要一定的基础,也需要去努力学习。我承担这个职务以后,感觉到很大压力。因为过去就是个组长或者是系统负责人,现在要全面承担 BEPCII 各专业的技术管理工作。除了真空盒以外的设备都和电专业有关系。电这行技术专业跨度很大,在加速器工程中涉及到从通用电子学、核电子学、自动控制,到高功率高频技术、电力变换、电磁场测量以及电磁兼容技术等方方面面。当然也有我们磁铁电源,这是电力电子专业;物理探测器那是涉及核电子学和数据

采集传输;高功率高频设备,是用于粒子加速的核心设备。要想做好总工的工作,这些领域基本知识必须具备,各有关设备的设计和技术指标必须了解。我们有个 BEPCII 初步设计书,是我学习的重要资料,不懂的问题可以请教相关课题组的同志。此外,我还兼任了中国散裂中子源(CSNS)的预制研究阶段副总师,担任博士生导师带学生,工作压力很大,我花了很大心思,到最后熬病了。

王:您当时承受的压力太大了。

徐:由于长时间紧张,导致经常失眠头痛。BEPCII 用了很多年轻人,他们都是本科硕士或博士生毕业,经验少,知识面窄,只懂自己的专业基础知识,缺乏加速器工程概念,要想把他们粘合在一块互相协作,我主要抓结合部位的技术指标。比如,磁铁对电流长时间的稳定性和短时的抖动都要求在万分之一,那么控制系统能不能做到?控制系统如果不行,那就得把它往一块儿接。哪个技术指标可以压缩,哪个不可以,你得决策,各个设计指标都要弄清,让他们去做。这个结合部位太多了,必须我出面签字,签字就是责任。他们每个系统和我有关的设计书,我从头看几遍,不懂就找专家去问,专家也会说这是他的一面之词。那我得交流,这个过程对我来说,是很难的,毕竟第一次担任这种职位。我做事比较钻牛角尖,不能马虎,不能含糊其词。有的时候两个方向确实冲突,支持谁?很难比较出优缺点,这个责任也挺大的。还有人事关系问题,你怎么支持我不支持他?另外我还有总体设计的具体任务,总体接地系统、电磁兼容技术规范都是由我亲自设计的。这个系统总体设计是我,各分系统指标的融合需要我去协调。我也具体参与了一部分磁铁电源设计和生产调研工作,重点是超导磁铁电源的

刘德康(1943-),1966年毕业于复旦大学,1968-1998年先后在中国原子能研究院和高能物理所从事加速器计算机控制、束流诊断方面的研究工作,曾担任室主任,1999年到上海应用物理研究所工作,后任上海光源总工程师、上海光源束流检测与控制技术部主任。

张闯(1944-),1968年毕业于清华大学,1975年进入高能物理研究所工作,曾任高能物理研究所副所长。他参加了北京正负电子对撞机设计、研制、调束、运行和改造等工作,在北京正负电子对撞机重大改造工程中担任工程副经理,负责加速器方面的研制工作。

结构设计和开发。还有一个任务是, 各种设备已经开始生产了, 要定型鉴定, 我得去参加, 不论是外地还是本地的, 一旦通过鉴定了, 我要签字。所以这个工作我感觉难度和体量都比较大, 对于一个电设备性能的理解和掌握, 不仅需要本设备的专业知识, 还需要有加速器基础知识, 这样才能了解它的功能要求和设计指标的制定依据。另外还需要对每个系统了解到一定程度, 得懂, 不懂要问。那时候身体几乎到了崩溃的边缘, 就到医院看病了。我今年 76 了, 现在身体还算可以。

王: 在这个过程中, 实际上也培养出来一大批人。

徐: 我认为 BEPCII 培养出了相当多的年轻人。当时我们的领导在各方面都启用了一批年轻人。我算是年纪大的, 因为参与过 BEPC、上海光源, 在国外工作时参与过多个加速器分系统的研制和总体运行工作, 经验多一些, 一直坚持在加速器这个岗位。BEPCII 时期, 加速器分部和实验物理部定期召开学术研讨会和各专业学术报告会, 各分系统互相交流, 这对青年人才的培养起了很大作用。由我出面组织的是工程技术协调交流会, 主要是讨论技术和工程技术指标协调, 也有设备设计方案、立项和研制设备的评审讨论等。这类会议每周都有, 多的时候一周四次, 都有会议记录。纪要起草之后得请参会人员修改, 我改完了还得请大家再看看, 反复确认后才能成为正式的会议纪要文件。我们加速器之所以搞得比较成功, 就是多层把关, 人人都要负责, 不是一个人说了算。

王: BEPCII 的建造和 BEPC 相比, 有什么新的挑战?

徐: BEPC 基本是参考相关的美国加速器设计, 正负电子在一个真空管道内相向运转。BEPCII 为了提高亮度设计了双环结构, 正、负电子分别在各自的真空管道内运转, 在对撞区交叉对撞, 这是个创新。可是在原有单环隧道内改建双环,

空间狭小, 尤其是对撞区设计困难大, 为此引入了高场强超导磁铁和超低温装置, 此前这些技术在我国基本是空白, 对我们是个重大的技术挑战。就我的具体职责来讲, 需要我对超导磁铁电源的技术性能指标和结构提出设计要求, 因此面临的压力很大。同时, 我作为总师要设计 BEPCII 整个装置的接地系统, BEPC 的时候做的接地系统, 是陈旧技术, 有不合理的地方, 但原有隧道要保留, 不可能把旧接地设施都去掉, 你要在原有建筑基础上去做新的接地系统, 会受到很多限制。不过这时候, 所里风气有了很大变化。进行技术交流和协调, 是工程管理的需要, 这必然促进高能所文化的改变, 封闭保守的风气已为大家所不容。我积极参与一些组织工作, 因为我是处在总工位置上, 必须挑头做这个事。例如, 我直接负责 BEPCII 整体的电磁兼容系统设计, 这种设计在 BEPC 时期是没有的, 是个新兴学科课题, 它涉及对各个分系统的电磁兼容技术要求, 在调研的基础上, 我除了制定出一套技术规范之外, 还要开办技术讲座, 对有关人员培训, 然后进行各系统的技术设计和交流。我们在做创建型的事业, 大家有这个创新的欲望, 学术思想活跃了, 有了自己的思想, 也有这个能力。可以说, 通过 BEPCII 的建设, 高能所整体创新能力上了一个台阶。这是高能所一大成就, 不只是我们装置的设计和建造工程见成效了, 而且建成了这么一支优秀的科研工程队伍。一个比较好的组织基础、队伍基础、工程制度基础, 这三方面保证我们能够在今后的大科学工程中, 取得更大的成功。我自己的成长进步就是在高能所这个大环境下取得的, 绝不仅仅是凭借个人的努力。

王: 从 BEPC 到 BEPCII, 高能所形成了独特的大科学工程管理体系, 请您谈谈该体系是如何形成的?

徐: 实际上是借鉴美国的。当年谢家麟院士从美国带回来一个本子, 讲的就是关键路径

法, 后来翻译成中文, 大家都去学这个东西, 在这基础上形成了一个适合我们的管理体系。这当中有消化和适应过程。因为美国情况和我们的情况毕竟不一样, 我们有自己的一些特点, 不能全部照搬。

王: 在您看来这个管理体系的特点是什么?

徐: 我不太知道美国特点是什么, 它给我们提供了一个工程管理体系的样本。我觉得从计划实施来讲, 核心问题是质量管理, 进度服从质量。我体会就是大家虽然有一个规范, 这个规范也是在使用当中完善, 一边实践一边完善。我参与的管理过程中, 有很多内容规程都是逐渐补充上来的, 所以首先这是一个逐渐完善的过程。但是制度要想实施得好, 各级都要有责任心, 要有科学的态度, 严肃的工作作风才行。一旦形成决议, 上头的命令下边必须执行, 这是比较严格的工程管理, 有部队的作风。另外从人的精神层面来讲, 要有责任心, 要有严谨的工作作风, 要有合作精神, 要团结。要个人服从总体, 互相融合, 即使有分歧, 大家也要团结, 都为的一件事, 为这个目的做好。我感觉这个观念在我接触的各个组中, 基本都是这样。个别的带头人某方面不好的, 我们就换人, 这个毫无疑问, 这种情况也发生过。

7 突破快循环同步加速器磁铁电源技术

王: 您 1998 年参与了上海光源的建设工作, 请您具体谈谈?

徐: 当时陈森玉同志找到我, 希望我到上海参加上海光源的建设。这是个第三代光源方案, 原来是由高能所提出来的, 我也参加过一些早期的可行性调研和概念设计工作。根据中国科学院

总体部署, 这个项目最后落到上海了, 由上海原子核所承担设计和建造。当时 BEPCII 已经运行起来了, 没有新题目可做, 人员队伍也比较分散, 有很多人调走了。高能所想抓住光源这个课题, 但是部署到上海了, 我也就没再想这个事。但是, 有一天陈森玉同志找到我说, 院里希望以他为首, 带过去一部分高能所专家参加这个项目的建设, 希望我参加。在陈森玉带领下我们考察了上海原子核所的情况。我和此前去考察的部分同事反复商量, 就同意去了, 有一些课题干, 比没有强。我在那里还是做磁铁电源, 就用到了开关电源。BEPC 就得上开关电源了, 但那是小规模、局部的。上海光源项目可以实现我以前建造开关型磁铁电源系统的愿望。除此以外, 上海光源的电源为什么我感兴趣呢? 那儿的加速器结构和 BEPC 不一样。BEPC 的加速器是直线加速器和储存环, 储存环运行时, 能量是固定的, 所以电源基本上是静态电源。上海光源的加速器有一个注入环, 即同步加速器, 它把低能粒子束加速到指定能量, 然后再注入到储存环中。同步加速过程是循环工作的, 一秒钟循环两次 (即每秒向储存环注入两次), 所以这是一个动态电源, 我们没做过。这个电源在循环工作过程中需要严格保持预定的电流曲线精度, 达到千分之一跟踪精度, 这对我来讲是新课题。当初在建 BEPC 之前, 要建大质子加速器的时候, 我就看到过此类电源的要求。我去上海主要有专业的考虑, 这个题目对我有吸引力, 有挑战性, 所以在那儿重点就研究这个, 方案就定下来了, 也参加了一些早期研制。这个过程里也参考了国外的一些设计, 我们考察过美国已建成的两个光源。当时在建的有一个瑞士光源, 参考它那个设计, 其实和我们想法

陈森玉 (1939-), 福建莆田人, 加速器物理学家, 中国工程院院士。1964 年毕业于清华大学。1982 至 1990 年, 作为北京正负电子对撞机工程的主持人之一, 负责完成了储存环的理论设计和建造。1995 至 2010 年, 先后任上海同步辐射光源 (简称 SSRF) 可行性研究组组长、工程总经理、工程总顾问, 负责组建工程研制队伍, 提出并确定 SSRF 的设计目标和设计思想, 主持完成工程的可行性研究、预制研究、初步设计, 并指导了工程建设。

差不多。这个思想是与国外平行进行的, 没有什么现成产品可以参照, 以后在这方面, 都是我们自己去考虑的问题。这里面和西安爱科赛博电子公司也有合作(起初叫西安爱科电子有限责任公司)。我们提供给他们一些资料, 无偿供给, 他们不断地实验, 最后总算解决了。还有一些小功率电源产品由北京的企业承担。据我了解, 这些企业现在发展得都不错, 他们承接了许多国家重要项目的工程任务, 包括生产军品设备。

王: 这个上海光源动态电源是做了一个尝试, 难度大的是散裂中子源快循环同步加速器电源, 请您谈谈它的主要难度。

徐: 快循环是指循环工作频率高, 中国散裂中子源(CSNS)动态电源循环频率达到 25Hz/秒, 上海光源是 2Hz/秒, 这是特点之一。第二个特点是运行功率很大。CSNS 属于重离子加速器, 主磁铁体量比电子加速器同步光源大许多倍, 不但输出功率大(超 10 兆瓦), 而且在循环工作过程中电源系统还存在非常大的无功功率吞吐, 处理不好会对加速器和电网稳定性造成影响。第三个特点是磁铁电源通过谐振网络供电。对第三个特点我简要解释一下: 循环速率高了之后那个磁铁负载感应电压很高, 如果所有主磁铁直接串联, 工作电压要高达几十万伏, 达到这个级别的大功率磁铁和电源的高压技术和生产成本太大, 在加速器空间里难于实现, 所以要采用负载谐振网络避免串联高压。谐振网络不仅仅有电源和磁铁负载, 还需要匹配谐振电容和谐振电抗器, 这个供电网络的专用名词叫怀特网路或怀特电路, 这是与上海光源动态电源的重大区别。^[3]我们过去没做过, 没有深入研究过它的工作特性, 特别是我们要做的是多怀特网路的磁铁电源系统(六套), 当时在国际上还没有这方面的研究资料, 需要我们自己去研究。针对这项课题, 我和研究生们一起攻关, 尽心竭力进行研究和试验, 解决了这些问题, 做得很好。这个我确实感到很骄傲的。

王: 能不能说, 这是您来高能所后最骄傲的一件事情?

徐: 在技术上应该是最骄傲的。

王: 这是哪一年成功的? 在这个过程中是怎么解决关键问题的?

徐: 2017 年。我们队伍整体由北京搬迁到东莞基地是 2013 年, 那时这个交直流组合型快循环主 B 磁铁电源、谐振电抗器和电容组等设备的样机都已鉴定成功, 开始进入整机生产阶段。但是, 单个设备的成功还不是电源整体系统的成功, 怀特型电源系统包括电源本机, 数十台磁铁负载(每台重几吨到几十吨), 数十台谐振电抗器(每台重达二十多吨)和数十套谐振电容组, 这些大型精密设备生产出来验收合格后, 安装在装置的不同场地, 通过特制的数千米电力电缆联结成谐振回路, 通过远程控制系统的操作实现运行状态, 达到运行指标, 这其中的工作量巨大, 难度很高。这时期也是最能检验质量管理效果的时候, 任何环节的不足都会暴露出来。CSNS 的电源安装、联合调试成功, 投入运行, 电源系统通过鉴定已经是 2017 年了。那时我已经退休了, 我的两个学生分别担任了磁铁电源系统负责人和 CSNS 副总工程师。这是经过我们两代人的努力获得的成果, 是非常大的突破。这里也有很多压力, 首先是主 B 磁铁电源的研制风险。国外都是用两台电源进行交、直流分离供电, 这种结构对电源设备本体技术难度就低了。而我们的研究表明分离供电会由于部件参数的误差产生较大的电压电流谐波, 对磁铁电流精度产生影响, 而且电源效率也低, 所以我们要走组合供电电源系统的路线。但是这样大的高功率、高精度、快响应交直流综合电源在国外散裂中子源上没有做过, 特别是日本那么好的电力电子技术(承包商是东芝), 它的工业基础比我们好, 但在主 B 磁铁电源上没有采用组合供电的技术, 国内能否开发出来? 还有大功率高精度谐振电抗器国内能否开发出来? 第二个问题

是电源系统同步控制和跟踪误差分析问题。英国散裂中子源加速器是二极磁铁和四极磁铁串联供电, 所以不存在跟踪问题; 同时它由交流电机提供交流激励, 电机的机械结构惯性大, 对加速器时钟的定位产生限制。日本二极磁铁采用交流直流分离供电, 其他磁铁电源必须跟踪二极磁铁电源。而我们有六套磁铁电源磁铁网路, 都是交直流组合串联供电结构, 因此必须采用新的同步策略。这不仅涉及磁铁电源系统同步跟踪控制精度和系统误差分析的问题, 还与加速器整体时钟的选择有关, 三者互相关联, 比较复杂。第三个技术挑战来自磁铁电感负载存在的强非线性。研制初期我们对此缺乏认识或估计不足, 等到磁铁样机研制出来后, 与电源联合调试时才发现问题严重性。磁铁负载在动态循环工作过程中铁芯有饱和, 意味着电源的感性负载是非线性变化的, 要求电源在循环工作全程中, 要高精度地调整励磁电流以确保磁场的工作曲线。这就像一个人挑一副担子, 行进中突然把你一个筐里东西拿走了, 要求你不能晃动, 要保持平稳。这是一个高难度研究课题, 我们的时间有限, 因此研制工作压力很大。可喜的是, 经过不断探索, 我们电源组开发出了高性能电源控制器, 建成了大规模多怀特网路型磁铁电源系统, 而且把电抗器结构和制造技术简化了。国外快循环加速器有的采用集总型电抗器, 把各谐振回路电抗器做成一体, 结构复杂, 体积庞大, 不适合我们这个能量较高的加速器。日本设计的是分离式电抗器, 但是每台谐振电抗器有两个绕组, 一个绕组是直流绕组, 一个是交流耦合绕组, 电抗器多了一套绕组, 技术成本就高了许多, 造价就上去了, 技术也复杂了。我们的设计是分离式电抗器, 避免了各回路参数误差的耦合影响, 而且仅有一个绕组, 交流直流都在里面通过, 所以成本也下降了。所以必须从加速器整体着眼, 不能只看局部, 一定要综合考虑。

王: 您刚才说的, 我觉得特别重要, 就是设计如果只盯着一点, 就走入死胡同了。要有一个

整体概念, 就是你这一块的设计和周围其他设计是关联的, 这样的话思路就打开了。

徐: 对, 虽然电源设备的容量和技术复杂了, 但其他方面反而简化了, 整体简化了, 我们没有设计带交流绕组的电抗器, 这省了很多人力和精力, 造价也下来了。

王: 当时这个创意是怎么来的?

徐: 2001 年我从上海回来不久, 就参加了 CSNS 的可行性调研工作, 负责磁铁电源课题。在研究资料的基础上, 由方守贤同志带队到英国已运行的散裂中子源和日本刚开工建造的散裂中子源进行了考察。英国设计同步加速器的主磁铁电源是交流分量和直流分量分别由不同电源供给, 电抗器有个交流耦合绕组, 由发电机提供交流激励电流, 我一看就觉得技术旧了。日本的主 B 磁铁电源也是交直流分离供电, 仅是采用开关型电源取代了交流电机。我看到它的主 B 磁铁谐振电抗器样机运行中振动噪音很大, 发热严重, 我产生了一个想法, 这种交、直流分离式供电显然效率低, 而且电抗器的电磁材料非线性影响不利于精度控制, 现在我们散裂中子源这个快循环电源系统, 如果不采用他们的方案, 能否把主 B 磁铁做成交流、直流组合供电呢? 交直流组合电源在日本或者英国的四级铁上用过, 但是规模小, 难度也小。我想, 四极铁能这样做, 二极铁也一定能。这里的关键技术, 一个是电源设备中电力电子器件串并联规模超大产生的工艺问题, 再一个关键是电源控制器, 这种控制器必须由课题组内部自行开发, 因为这需要了解磁铁负载特性, 在调试过程中需要磁铁配合, 进行磁场测量验证, 这不是外部承包企业可以解决的问题。考虑到当时相关技术已经发展到相当水平了, 这个方案应该是可行的。回国后我一直在研究这个问题, 得出了明确的理论分析结论, 到 2006 年 CSNS 进入到预制研制阶段, 我下定决心, 采用这个方案, 研制试验样机。我们在 2009 年的工程初步设计

中,正式选用二极磁铁电源方案,开始整机研制,这时距离预定的设备建造完成时间还有五、六年。在这个课题上我们有多年的理论研究基础和试验工作基础,再考虑到技术应该是不断进步的,我也对这个技术有信心,对咱国家的技术进步有信心。随着磁铁电源技术和控制系统速度在不断提升,到时候一定可以。当时世界上一共就四个散裂中子源,别人都和我们不一样,美国和我们同时建的,但他的加速器结构与我们不同,英国和日本建完了,和我们都不一样。我看到这个发展趋势了,如果只看当下是过不去的。

王:实际上散裂中子源项目也给您施加了很大压力。

徐:对,BEPCII 预研制及建造和 CSNS 的调研设计是同时进行的,我同时担任两个工程项目的课题研究工作和总体管理工作,放松不下来。我担任 BEPCII 副总师后不久,我的学生张旌接任了磁铁电源系统负责人。我 2006 年兼任了 CSNS 预研制阶段副总工程师,到 2010 年底我办理了退休手续,担任 BEPCII 顾问,继续代理一段时间 CSNS 研制阶段总师。2011 年 10 月 CSNS 项目得到国家批准,各系统全面启动了设备研制建造工作,我这时期工作负担明显加重,主要是把预研制项目结题转向整机建造,此间,进行了大量的项目评审鉴定工作和工程招标工作,到 2012 年基本完成。我是考虑到自己身体,特别是因为近几年听力下降很多,进行工作交流有一定困难,因此就逐渐淡出了。另外,年轻人也都培养起来了,他们可以干得比我强。2013 年初,CSNS 整体工作和人员由北京转到东莞,张旌接任了散裂中子源电气设备总师。我另一个学生齐欣做博士论文的时候,课题就是中国散裂中子源磁铁电源系统,现在是 CSNS 磁铁电源系统负责人,这套电源样机就是她在张旌帮助下做成的。现在他们都成才了,我也算放心了,这也是令我骄傲的地方。

王:那请您谈谈他们在散裂中子源电源系统

方面的工作?

徐:我担任总师职务后,把较多的精力花在了其它分系统和总体技术管理工作中,在磁铁电源系统方面直接参与的研制工作少了,张旌在磁铁电源系统的设计和研制工作中做出很大贡献,例如,对磁铁励磁电流非线性谐波补偿策略就是由张旌提出的,这是 CSNS 磁铁电源的关键技术。后来在 CSNS 建造阶段,磁铁电源系统的安装、搭建和总体调试工作难度很大,遇到很多困难,他和齐欣合作,带领电源组同志出色完成了任务,电源系统按预定指标投入运行。齐欣毕业的时候,拿到了优秀毕业论文院长奖。主 B 磁铁电源的研制负责人就是齐欣,她在后来的工程工作中表现也很突出,今年(2019 年)获得了全国五一巾帼标兵称号。张旌读研究生的时候应该是 BEPC 时期,那时候选的课题是一个新技术——功率因数补偿。功率因数代表了电气设备利用电网的效率,当交流电的电流和电压是同相位时,功率因数为 1,一般来讲电气设备功率因数小于 1,因此电网利用率就低了。在加速器磁铁电源设备中进行功率因数补偿,提高电网利用率,当时属于先进能源技术课题,据我了解那时国内加速器领域内还没有人去做这个课题。我说你这个题目是博士生题目,我也没太多资金支持,但他做下来了,是以硕士题目做的。齐欣的论文有两个突破。首先,怀特型谐振供电网路有不同的激励方式和励磁结构。那么,选择哪种谐振网络类型和励磁方式,才更有利于磁铁电流精密控制?这篇论文对这个问题进行了较深入和全面的理论分析,并给出了仿真结果,较好地回答了这个问题。其次,当初美国人发明谐振网络电源的时候,是把四极磁铁电源和二极磁铁电源串在一套谐振网路里,二极磁铁和四极磁铁的电流是统一的,不存在互相跟踪问题。而我们这是六套独立的谐振网络,要求各套网络中的磁铁电流同步跟踪。论文在对多套谐振网络性能和参数误差分析的基础上,建立了一套电源系统设计判据,同时提出了多谐振网络

磁铁电源系统同步控制策略。这两个研究成果为后来的工程设计提供了理论基础和设计依据, 因此是非常重要的。^{[4][5]}

王: 您多年来一直做电源, 有很多成果。从成果转化的角度来说, 您有没有做过什么工作?

徐: 不能说特意去做, 但是我们为了达到设备要求, 和厂家是不断交流的, 企业在研制和生产电源设备过程中, 利用我们的研究经验和成果攻克了许多技术难关, 因此可以说, 我和我的同事为促进国内电源企业的发展做出了一些贡献。但在电源非线性补偿这方面, 完全是我们实验室为主的, 我们仅是无偿交给厂家去使用。CSNS 带有非线性补偿功能的磁铁电源控制器, 是磁铁电源组以龙锋利(现任组长)为首的同事在 BEPCII 项目上开发的电源控制器的基础上, 进步升级改造开发出来的, 前面说过, 这里芯片内容需要配合磁铁的特性参数, 所以工厂做不了这种控制器芯片。只要承接了我们电源设备制造的工厂, 必须使用我们提供的电源控制器, 其费用在电源成本中扣除。这相当于我们与工厂合作研制生产, 为工程项目节省了资金。这个芯片在别的厂家也没用, 不做磁铁电源非线性负载励磁也用不着这个。我们掌握的这个核心技术, 也是电源组团队花了多年自己搞出来的, 不容易。

8 心系人才

王: 高能所是依托大科学工程起家的, 请您谈谈高能所人才队伍的特色?

徐: 人才队伍大体上分成两拨儿人, 一个是实验物理, 一个是加速器工程, 他们专业不同但互相关联。另外, 高能所还有天体物理、理论物理、计算机技术、同步辐射应用和核科学应用等队伍, 这些科研队伍除同步辐射应用外, 与加速器装置关联不多。实验物理实际上也有两部分人, 有专门进行数据分析的, 还有一部分是搞探测器设计研制。高能物理加速器必然有探测器, 探测器这部分人要搞工程, 规模很大, 有硬件, 有软

件。核电子学设备是物理探测器的重要部分, 这些也是工程项目。我们做电气设备总师的对于探测器电方面的东西也要管, 主要是监管它的电磁兼容、配电与接地系统的设计是否符合整体要求, 因为探测器接收的粒子事例信号很弱, 电磁兼容措施和接地系统不到位就会使环境噪声淹没粒子信号。其次是要要求远程监控接口技术标准要一致, 特别是慢控系统设备标准要和加速器的一致, 这样才便于整个装置的统一监测, 降低建造成本。当然不会监管得像加速器各个系统那么深入, 但是也要做的。所以我也了解他们一些情况, 他们有一些比较好的人才也往加速器这边流动。针对不同类型的科研人员, 评价体系也就有所不同。对于搞大科学装置工程的科研和技术人员, 不能只看重论文发表, 首要的是专业设计和创新能力, 团队工作品质好, 这两条是最关键的。

王: 您做大科学工程这么久, 能否从我国大科学工程建设的角度提点建议?

徐: 以散裂中子源来讲吧, 这个加速器与 BEPC、BEPCII 是不同的, 前两个加速器都是电子储存环, 是轻粒子加速器, 而散裂中子源是重粒子加速器, 加速的是质子。质子和电子高能加速器有质的不一样, 过去我没搞过, 高能所也没搞过。所以, 设计建造散裂中子源应该是高能所的一个突破。那么这种涉及很多新技术的大科学工程项目, 作为一个有广泛应用前景的科研平台, 应该提前布局, 给资金搞预研。但是, 散裂中子源没有得到国家层面很有力的提前支持。那我们怎么搞呢? 除了中国科学院给了少量预研费, 广东省为争取这个项目也给了一部分资金。这些钱本来是为支持高能所的, 但实际用来做预研设备。BEPCII 的时候是我们拿一部分运行费来做预研, 钱少, 这么多人得不到什么更好的待遇, 只能越来越苦, 事情越做越多。散裂中子源 2017 年开始试运行, 但实际上十几年前我们就提出了这个项目, 进行了这么多年的专家论证, 科学目标也是很清楚的, 当时就应该有渠道提供预研资金。没

办法,只好靠下面的人东奔西走,争取地方资金,去做早期预研制工作。实际上大科学工程的一个突出特点,就是它需要长期积累,需要好多年的预研研究。现在好多了,但基本上还是一事一议。我希望国家有这样的长效机制和机制,有前瞻性安排,预研工作就有资金支持,人也能培养出来了。我们散裂中子源如果没有科学院和广东省预先投入的那点钱,哪能培养出来这么多人?我们在上海光源的预研,是科学院给的钱,也不是国家给的专用研制费。上海光源搞的时候我们各系统负责人几乎是光杆司令,没有人。刚开始上海方面告诉我们原则上没有,刚组建电源组时仅有来自上海原子核所的两位老科研人员。我从南京航空航天大学招了六个刚毕业的学生,他们本来都填志愿要干别的工作了,经过动员给招过来了。这些人怎么成长起来?你不给资金怎么行?我的学生齐欣做博士论文,为什么在散裂中子源上能做出点成绩?那得有资金,不能像一些大学一个导师同时带很多博士硕士生,那不行。我就带她一个,她做实验和研制样机动了不少预研费用,从这个角度讲她的成长,那是钱支持出来的。

王:您当时是常驻东莞吗?

徐:我没有长驻东莞,仅在那里进行一些短期顾问工作,我还留在北京,做了一些 BEPCII 的顾问工作。2013年 CSNS 主体人员往广东迁移的时候,我找到工程经理,说工程已经正式开始了,我这个岁数也大了,身体也不是特别好,建造阶段的工作我就不去了,我推荐了张旌接替我总师的工作。他能力强,应该及早任命他,因为各个系统,需要花时间熟悉。如果他只是一个磁铁电源组组长,那他对其他系统就没有了解的兴趣,必须压担子让他尽早熟悉各个部门。当时还有金大鹏,我向经理推荐说,你要用他当控制组组长,要早下决心。金大鹏是实验物理部慢控制系统负责人,我了解他的工作。有一些控制接口硬件的模块,从总师角度看,既然各个系统都要用,器件标准要一样。根据我的调研,用日本的

模块比较适合,这样加速器系统各个硬件系统的控制模块、控制接口标准都一样,价格虽然高一点,但功能强。金大鹏他行动比较早,在我定之前他选的是西门子模块,已经搭建了分系统模型。我在经理部会议上了解到这个之后,和他们主管经理说,得请金大鹏放弃原来的方案,把西门子器件统一换成日本的,控制系统下面各个部分都要用一个标准,主管经理毫不犹豫,说必须得换。我原以为金大鹏会很抵触或者会有抱怨,可是他一声没吭,很快用日本器件建立了新系统,这令我很感动,觉得这个年轻人有大局观。后来他转到东莞,在那儿扎下根了,现在从一个系统负责人升任为散裂中子源装置的副主任了。我推荐他去搞控制系统,负责加速器的总体控制系统。物理实验站的慢控系统是比较局部的,而加速器总体控制系统是全局性的,难度比较大。控制系统和电源组是两个分系统,这是 CSNS 装置总体的中央控制系统,它的基本任务是在对装置各分系统设备(包括磁铁电源系统、高频系统、定时、真空、束流测量、联锁保护、靶站、辐射防护系统等)和安全环境进行实时监控的基础上,设定运行模式和运行参数,提供加速器整体运行的操作平台。中央控制系统通过控制接口实现对各分系统硬设备的远程监控,但它不负责各分系统设备的功能和性能的控制。例如磁铁电源系统,它也有内部控制器,也有控制软件,对电源进行精密调节和跟踪控制、对电源设备运行参数采集和实行连锁保护等等,这就是分系统的内核控制,以确保电源设备的功能和性能的实现。它和中央控制的联系内容主要包括下载和执行由中央控制下达的运行命令、参数,上传回采参数和运行状态。中央控制对磁铁电源的监测和运行操作是加速器运行操作的主要内容之一。这个控制系统的内容是全局性的。这里的工作压力很大,金大鹏能顶住,我是打心眼里佩服的,也为他感到高兴。

王:后继有人了,的确值得高兴。在高能所

这么多年来,您做出了突出贡献,有很多值得骄傲的事情。那您有没有什么遗憾的事情?

徐:遗憾肯定有,有些觉得不满意。由于自己疏忽了,图快了,差点把设备给损坏了,也犯过这种错误。当时的情况很复杂,在一次调试实验开始前,听信了一位主管同志的口头承诺,没有到现场查看实际情况,造成了一些事故,这虽然不能说是我一个人的责任,但是我在其中,为什么没及时发现这个问题?尽管没有造成大的设备损失,但我认为这些问题是可以避免的。这个与做研制失败还不是一回事,研制是允许失败的,设备从开始研制到最后成功,实际上中间不成功的地方还是挺多的。没预见、经验不足或者是思路不对,都可能引起失败。

王:可以看出来,您对自己要求非常严格,一丝不苟,给自己也造成了很大压力,现在回头看,您觉得当年有些时候是不是有点过分认真?

徐:有的时候是有点过分了。主要是觉得责任很大。不能说我不是大头头,就没责任,不是这样的。你负责的这些内容如果出错了,那说不

过去,那不应该。

王:好的,徐老师,很钦佩您的这份责任意识。您做了一辈子大科学工程,特别不容易。回顾您走过的路,做出的贡献,令人感动,我们收获很大。非常感谢!

致谢

感谢徐中雄先生接受访谈,并修订访谈整理稿,提供原始图片及相关资料,同时感谢高能物理研究所苏萍老师帮助安排访谈事宜。

参考文献

- [1] 吴新明. 军中名校哈军工[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
- [2] 徐中雄. CCD 型束流截面探测器[J]. 原子能科学技术, 1987 (6): 695-699.
- [3] 齐欣, 徐中雄. 中国散裂中子源快周期同步加速器磁铁电源系统的研究[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(3): 362-366.
- [4] 齐欣, 徐中雄. 基于 3 单元模型的怀特电路特性[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(4): 475-479.
- [5] 齐欣, 徐中雄, 张旌. 基于不同激励源模式下并联型怀特电路特性[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(1): 92-96.

40 Years of Exploration of High Energy Accelerator Magnet Power Supply: An Interview with Xu Zhongxiong

Wang Dazhou, Song Linke

(School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This text is one of a series of interviews for the project of “Data Collection on the Academic Growth of Innovation Teams in Construction of the Beijing Electron-Positron Collider” sponsored by the China Association for Science and technology. It is compiled according to the oral data of Mr. Xu Zhongxiong, a senior researcher from the Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences. From eighth aspects as study at Harbin Institute of Military Engineering, working at the 9th Academy of National Defense Ministry, being employed by the Institute of High Energy Physics, visiting Cornell University, being a magnet power supply group leader, served as deputy chief engineer of BEPCII, breakthrough in fast loop power supply technology, and recommending talents, narrates his 40 years experiences with the construction of Beijing Electron-Positron Collider, of Shanghai Synchrotron Radiation Facility and of Chinese Spallation Neutron Source, constantly exploring the research and development history of high-energy accelerator magnet power supply, and reveals the special function of the big science project as a source of technological innovations and talents training cradle.

Key Words: Xu Zhongxiong; Beijing Electron-Positron Collider; Shanghai Synchrotron Radiation Facility; Chinese Spallation Neutron Source; magnet power supply