

# 高能激光系统中的物理问题\*

苏 毅<sup>†</sup>

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

**摘 要** 文章讨论了高能激光系统存在的一些物理问题,着重分析了高能激光系统能力的物理限制,全系统光束质量控制,光束通道和光学元件热效应的产生和抑制,并报道了相关的模拟实验结果.利用数千瓦的氧碘化学激光器(COIL)系统,研究了激光器输出光束的稳定和净化效果,镜面和镜架热效应及其抑制方法,以及通道介质的热效应及其抑制方法.最后还介绍了全系统光束质量一体化控制的共光路共模式(CPCM)自适应光学校正方法.

**关键词** 高能激光,光束质量,热效应,自适应光学

## Physics problems in high energy laser system

SU Yi<sup>†</sup>

( Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China )

**Abstract** this paper reviews several basic physics problems in high energy laser system, emphatically analyzes the physical limit on ability of high energy laser system, and beam quality control in the whole system. Some simulation experiments using a chemical oxygen\_iodine laser ( COIL ) operating at power levels of several kW are reported. The experiments studied the effectiveness of beam stabilization and clean - up, the thermal effects of optical components and media in the beam path, and approaches to rejection of thermal effects. An integrated beam quality control scheme, so called " common path/commom mode " ( CP/CM ) approach is introduced also.

**Keywords** high energy laser, beam quality, thermal effect, adaptive optics

## 1 引言

高能激光系统利用高能激光器和光束控制器,把激光辐射以足够大的功率密度和能量密度,在足够小的立体角内定向地投射到远距离目标上.高能激光的产生及其在系统内的传输、变换、发送,直到与传输路径上介质的相互作用,存在一系列复杂的物理问题.本文对高能激光系统中的一些物理问题进行分析.着重分析和讨论高能激光系统能力的物理限制和全系统光束质量控制,激光器输出光束的稳定和净化,镜面和镜架热效应的抑制,通道介质的热效应的抑制,以及全系统光束质量一体化控制的共光路共模式(CPCM)自适应光学校正方法.

## 2 高能激光系统能力的物理限制和全系统光束质量控制

为了能在靶上获得高的辐照度,除了要求激光束要有高的功率,还要有极好的光束质量,才能使激光束聚焦到靶上的光斑小、功率密度高.光斑的尺度亦即光束发散角,受到爱里斑衍射极限的限制,这是个物理极限.实际的光束又都与理想光束有差距,如频率展宽、波面畸变、强度起伏,使光束远场发散角大于理想光束衍射极限发散角.对于高能激光系统,为使激光束具有小的远场发散角,首先要选择较短

\* 国家高技术发展研究计划资助项目

2004 - 10 - 19 收到

<sup>†</sup> Email : suyi@caep. ac. cn

的激光波长和大的发射口径.当波长和口径确定后,光束质量因子 $\beta$ 成为激光束到靶的辐照度的决定因素, $\beta$ 为实际光束远场发散角与同样尺度的理想光束远场发散角之比.在影响光束质量的多种因素中,光束波面的畸变是最敏感和最重要的因素.因此,光束质量的控制可以归结为激光束波面的控制.

影响光束波面的因素有很多,从激光器一直到靶的全路径上的所有器件和介质都会或多或少地造成激光束波面的畸变.因此,必须实施全系统光束质量控制,才能保证到达靶面的光束质量,获得高的辐照度.

首先是激光器中激光腔光学器件的面形误差、热畸变、激光介质的不均匀性、调腔误差等,使输出光束的波面畸变,降低光束质量.对于高能激光器来说,几乎不可能直接达到必要的光束质量.必须采取光束净化措施,提高激光器输出的光束质量.通常采用变形反射镜校正自适应光学系统将激光束校正为理想波面,如理想平面波面,也可以采用非线性光学相位共轭镜校正畸变波前.

激光器输出激光经过导光、变换由光束定向器发射,在其路径上的光学器件和介质也会造成光束波面的畸变.对于高能激光系统,热畸变的影响尤为严重.必须采取措施抑制热畸变和校正热畸变的影响.

激光束发射到靶目标上,如果路径上有大气等介质,大气湍流、热晕效应会使激光束波面畸变.应选择激光波长处在大气窗口内,以减少大气吸收和热晕效应,并利用自适应光学系统校正大气湍流和热晕的影响.

### 3 激光器输出光束的稳定和净化

自适应光学技术可用于稳定激光器输出激光光轴,校正激光束波前误差,从而提高光束质量,这称为激光器输出光束的稳定和净化.高能激光器光学腔内光学器件的热效应和激光增益的变化,引起的波前畸变的最主要成分是离焦.光束净化分为激光腔内光束净化和激光腔外光束净化.激光腔内光束净化是将波前校正器置于激光腔内,校正腔内像差.激光腔外光束净化是将波前校正器置于激光腔外,校正激光器已输出激光的波前畸变.图1为腔外光束稳定和净化实验系统示意图.自适应光学系统通过分束镜,用波前探测器实时测量激光束波面整体倾斜和波前畸变,用波前处理器重构相位波前,产生

校正信号,经功率放大器放大后分别控制快速倾斜,控制反射镜(FSM)和变形反射镜(DM)致动器,使镜面产生共轭形变,实现波前倾斜和畸变校正.实验中,通过另一分束镜用CCD成像系统测量远场光斑和光束质量.图2示出光束净化前后的远场光斑,可见净化后焦斑变小变圆,光束质量明显提高.

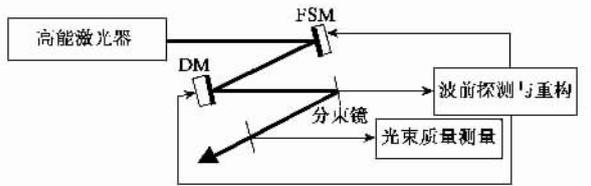


图1 光束稳定和净化系统示意图

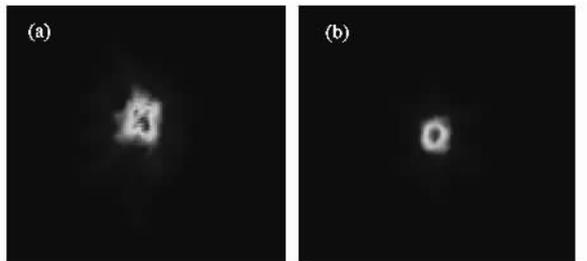


图2 光束净化前(a)后(b)远场光斑

尽管一般地说,远场发散角主要取决于波面相位误差,强度分布的不均匀性本身对远场光斑的影响较小,但是在高能激光传输过程中却造成一些严重的问题.如不均匀的强度分布使镜面和介质加热不均匀,大大增加了镜面面形畸变和介质折射率梯度,从而增大波前误差,使光束质量下降.特别是若在近场光束中存在很强的亮斑,即通常所说的光钉子,还会对光学器件造成损伤.通常自适应光学技术只能实现波面误差校正,无法解决强度分布不均匀性带来的问题.因此,应对激光器本身采取各种措施,以保证激光光强分布的均匀性,特别是必须消除光钉子.例如避免腔内激光寄生模的产生,实现精确的光腔准直调整.

### 4 镜面与镜架热效应的抑制

在激光系统中,扩束到发射主镜前的强激光束的直径都比较小.导光和光束变换光路中有一系列的反射镜,承受很高功率密度的强激光照射.镜面对强激光的吸收,特别是光强分布不均匀的激光束,会引起镜面面形的畸变,导致产生光束波前误差,使光束质量下降.Zernike多项式是描述相差的

一种常用形式. 光束质量因子  $\beta$  与波面相位均方根误差  $\sigma$  的关系可以用 Zernike 多项式各阶像差拟合为<sup>[1]</sup>

$$\beta = \left( \sum_{j=1}^n A_{2j} q_j \right) \sigma^2 + \left( \sum_{j=1}^n A_{1j} q_j \right) \sigma + 1, \quad (1)$$

其中  $A_{2j}$  和  $A_{1j}$  分别为对 Zernike 像差模式  $j$  的拟合系数  $q_j$  为第  $j$  阶像差的权重. 图 3 示出一个典型的像差分布下均方根像差与光束质量因子的关系曲线. 可以得到一个粗略的计算公式:

$$\beta \approx 15\sigma^2 + 10\sigma + 1, \quad (2)$$

式中均方根波前误差  $\sigma$  的单位是波长.

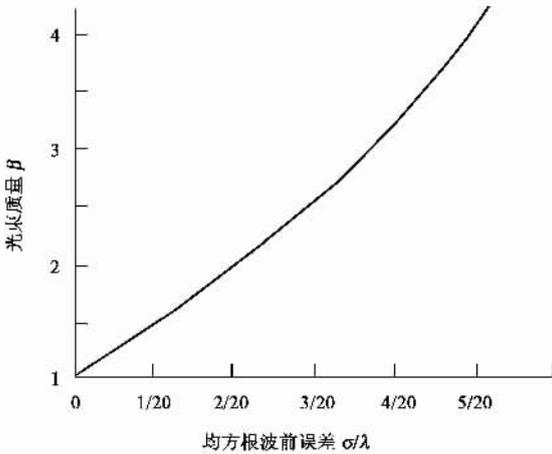


图3 光束质量因子  $\beta$  与波前误差  $\sigma$  的关系

光路中的介质和一系列光学器件对激光束产生波前误差, 分别具有各自的光束质量因子  $\beta_n$ , 其意义是一个理想衍射极限光束, 其光束质量因子  $\beta = 1$ , 通过该器件后光束质量变为  $\beta_n$ . 设各器件光束质量因子分别为  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ , 系统总的光束质量因子是各个器件作用的累积结果, 当各个因子较大时, 总的光束质量因子  $\beta_0$  可估算为<sup>[2]</sup>

$$\beta_0 = (\beta_1^2 + \beta_2^2 + \dots + \beta_n^2)^{1/2}, \quad (3)$$

因此, 必须严格控制每个器件的面形误差. 要减小强激光照射下镜面的热变形, 关键是减少光学器件对激光的吸收. 在高能激光系统中, 应尽量采用反射元件, 避免使用透射元件. 反射镜镀膜应对高能激光具有极高的反射率, 其基底材料应有高透过率和热传导率以及低的热膨胀系数. 应将镜背面抛光后镀增透膜, 使进入反射镜的光透过, 避免激光在镜内的多次反射, 进一步减少对激光的吸收. 我们应用数千瓦的氧碘化学激光器 (COIL) 开展了镜面热效应的实验研究. 实验结果表明, 当反射镜对强激光的吸收小于万分之一时, 对功率密度为  $\sim 1 \text{ kW/cm}^2$  的激光,

反射镜产生的热变形像差可以控制在可接受的水平.

在强激光作用下, 反射镜会产生整体倾斜, 使光轴漂移. 一是由于镜面直接吸收强激光, 特别是强度分布在截面的一个方向上强时, 光束强的部分镜面升温高, 产生镜面倾斜. 另一个重要原因是, 即使强激光是一束准直平行光, 由于高阶模的发散, 仍然会有很强的近场弥散光打在镜框上, 加热镜框使其变形, 造成反射镜面倾斜. 为避免弥散光照射到镜框上, 可以采用远大于激光束直径的大口径反射镜, 并在镜架前加挡光光阑. 一种有效的结构是在镜架上安装双层隔热支撑光阑, 使光阑尽量靠近镜架, 挡光效果好. 图 4 比较了有无光阑时光轴的漂移. 是用氦氖激光作为探针光测量光轴随时间的变化, 得出镜面热变形的整体倾斜量. 图 4 中曲线出现变化点为强激光照射时间. 可以看出, 镜框前无光阑时, 由于强激光束的弥散边缘打在镜框上, 可造成镜面整体倾斜大于  $10''$ ; 镜框采用双层隔热固定支撑光阑防护, 镜面整体倾斜减小到  $1''$  以下, 可基本消除强激光高阶膜分量对镜框加热引起的镜面倾斜变化. 强光照射下未加光阑时, 在垂直方向即  $Y$  轴方向上光轴漂移量较大, 是由于镜架结构在这个方向上对反射镜没有完全束缚. 镜架的设计应把反射镜在各个方向上紧紧束缚住.

## 5 通道介质热效应的抑制

在高能激光系统的导光通道中, 介质为空气时, 由于空气吸收激光能量而被加热, 产生折射率的变化, 使激光束波面畸变, 称为系统内的热晕效应. 由于通道中光束口径较小, 功率密度非常高, 其热晕效应比扩束发射后的大气热晕效应严重得多, 即使在几米的很短距离上, 也会使光束质量严重退化. 氟化氙 (DF) 激光波长为  $3.6\text{--}4.0 \mu\text{m}$ , 处在  $\text{CO}_2$  吸收带, 氧碘化学激光 (COIL) 波长为  $1.315 \mu\text{m}$ , 处在  $\text{H}_2\text{O}$  吸收带. 空气中的二氧化碳和水蒸气分别为这两种激光的主要吸收成分. 通道介质的热效应不仅使光束波面变坏, 而且对在截面上强度分布偏向一边的光束也会造成严重的光轴倾斜. 为减小介质对高能激光的热效应, 可以采用吹风的办法, 使介质垂直光轴流动, 减少热累积. 但是吹风会引起湍流, 使光束质量下降. 更为有效的办法是导光光路采用密封管道, 抽真空或再充以对激光吸收率低的气体 (如充氮气或氦气), 并保持一定的正压, 可以减小

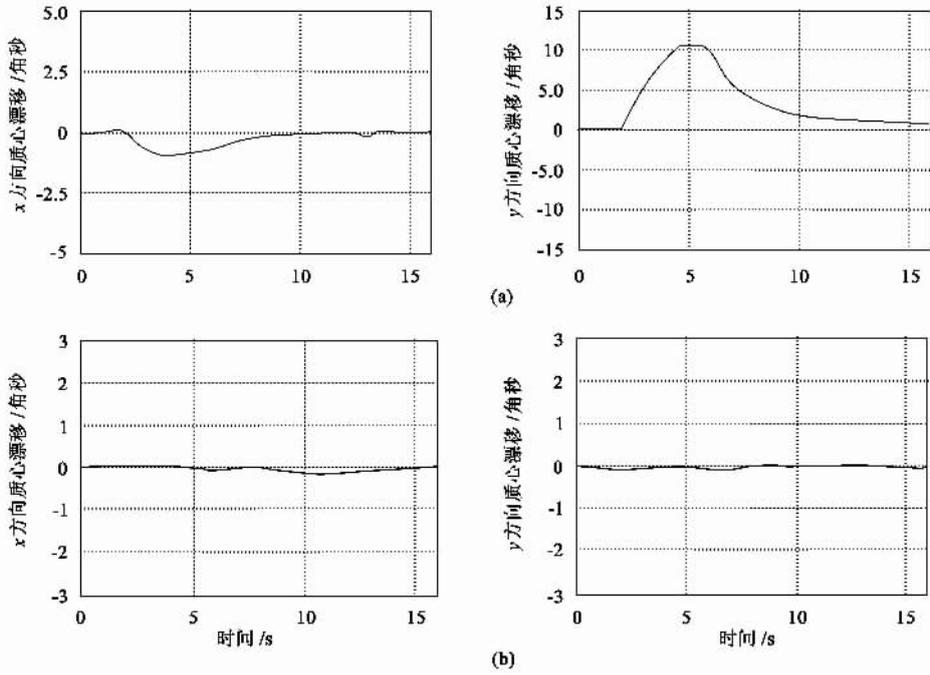


图4 镜架前有无光阑时光束漂移的比较 (a)未加光阑 (b)加双层隔热固定光阑

对真空系统的密封要求。

图5为研究通道介质热效应的实验光路示意图。实验中,在强激光通过通道时,用氦氖激光作为探针光,测量光束质量,判断通道热效应对强激光光束质量的影响以及抑制措施的有效性。图6(a), (b)分别示出在导光管道内强激光传输5m长,管道中介质为空气和抽真空后充氮气两种条件下测量的光束质量、光轴漂移和远场光斑。实验中管道空气的绝对湿度为 $15\text{g}/\text{m}^3$ 。测量结果表明,空气的绝对湿度越高,光路越长,引起的光束质量下降越严重;采用导光管道抽真空充氮气并保持一定正压,对保持强激光通过管道后的光束质量非常有效。

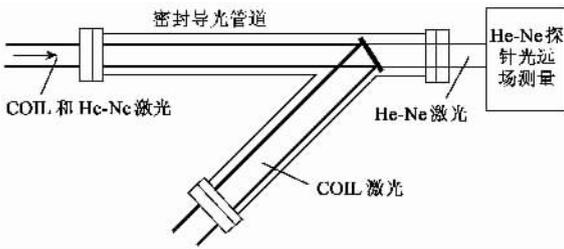


图5 通道介质热效应实验光路示意图

## 6 全系统光束质量一体化控制中的若干问题

在高能激光系统中,通常采用两个自适应光学闭环回路,一个回路用来校正激光器输出激光波前畸变,即光束稳定和净化回路,因为波前探测器的信标来自激光器,又称为对内自适应光学回路。另一个回路是用来校正导光光路和到目标的大气引起的激光束波前畸变,信标来自目标方向,称为对外自适应光学回路。这两个闭环校正回路间不能重叠,否则会产生交叉耦合,引起不稳定性。两个回路中的信标光都需要透过分束镜进入波前探测器,如图1中的分束镜。波前探测器测量不到分束镜的面形像差,也就不能对其面形误差引起的波前畸变实施校正。结果是,两个闭环回路都不能对各自的探测分束镜和两个分束镜之间的介质产生的波前畸变进行校正。为实现激光束净化和对全光路所有光学器件与介质的波前畸变进行校正,Kenneth等人<sup>[3]</sup>设计了一种叫做共光路共模式(CPCM)的自适应光学校正系统。图7为一种只使用一个自适应光学闭环回路的CPCM光路原理图。图中 $W_L$ 为高能激光束波前, $W_B$ 为目标返回的信标波前。CPCM光路把上述的对内自适应光学回路和对外自适应光学回路结合在一起,不再是先光束净化,使高能激光波前校正为平面,然后再使其波面与目标信标光波面共轭,实现对外光路的波前畸变校正,而是在高能激光束原有波前上直接进行校正,使其进入发射主光路(图7中共孔径元件左方)的波前与目标信标波前共轭。这

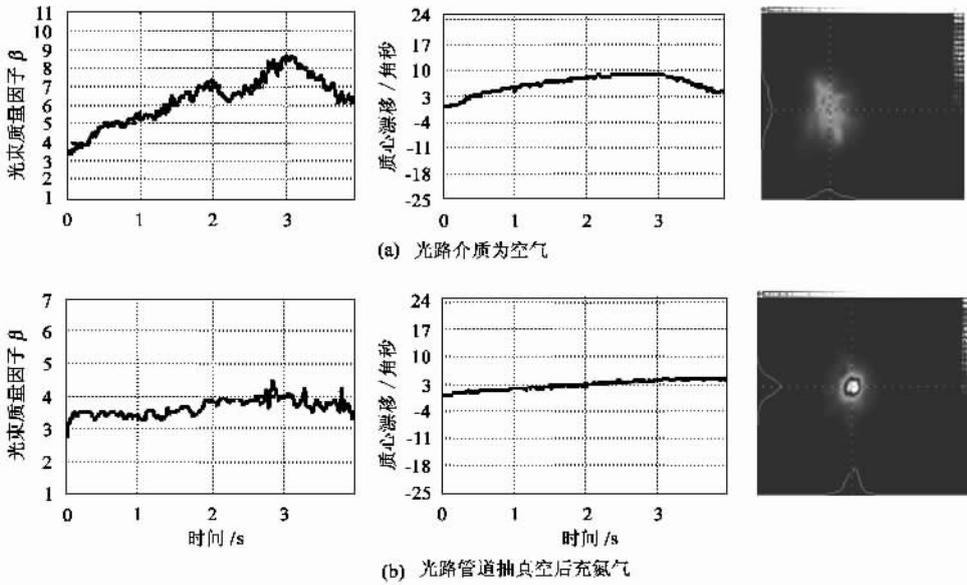


图6 光路介质对光束质量(左)、漂移(中)和远场光斑(右)的影响

样就同时实现了高能激光波前误差和光路(包括大气)波前畸变的校正。高能激光束波前探测和目标返回信标的波前探测,共用一个分束镜,该分束镜为共孔径元件(ASE)。高能激光在分束镜前表面反射进入激光发射主光路,极少部分透射光束经一个后向反射器阵列反射回到分束镜,作为校正高能激光束的信标光,被分束镜再次反射进入波前传感器光路。目标返回信标透过分束镜直接进入波前传感器光路。这样,除了后向反射器阵列光路外,目标信标光和高能激光在波前探测回路上共光路。而后向反射器阵列产生的共轭反射光  $W_L^*$  可以消除该光路的像差。在共光路中,利用结构相同的两个波前探测器组成一个共模式波前探测器,分别测量高能激光波前畸变和目标信标波前畸变,计算出两个波前相位的差值  $W_L^* - W_B$ ,作为高能激光重构波前校正量,将其转换为变形反射镜的驱动信号,改变高能激光束的波前。这样,一次校正后两波面相位的差值为零,在激光发射主光路,校正后的高能激光波前就与目标信标波前共轭,使到达目标的激光波前为平面。共模式波前探测器仅对同时测量的高能激光信标和目标信标光波前的差敏感。由于后向反射器阵列的共轭反射光是经共孔径分束镜反射进入波前探测器的,目标信标光是透射过分束镜,分束镜的像差和热变形只对共轭反射光产生波前畸变,可以被共模式波前探测器测量到。共模式波前探测器测量的两个信标间的波面差,由高能激光波面上加上共孔径分束镜像差与目标信标波面的差构成。这样就一次同时

实现了对内外光路的波前畸变校正。CPCM 波前校正方法的优点是实现了全光路所有器件和介质像差的校正,实现了全系统光束质量的一体化控制。同时,由于共光路和后向反射器阵列的应用,增大了对系统光学器件定位、调轴和对准的容余度。

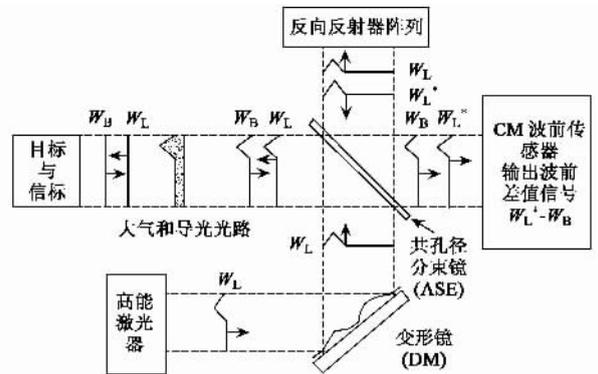


图7 全系统波前校正 CPCM 原理图

## 6 结论

本文讨论了高能激光系统存在的一些物理问题,特别是影响系统发射光束质量的因素。在强激光传输中,系统内、外器件和介质的线性和非线性效应会严重影响光束质量。合理选择系统参数,加强各环节光束质量测量,确定影响光束质量的因素,采取相应措施进行抑制或校正,才能真正发挥系统能力。高能激光器输出激光几乎不可能直接达到必要的光束质量,必须采取光束稳定和净化措施,提高激光器输

出的光束质量.提高反射镜镀膜反射率,减少吸收率,光学镜架前采用双层隔热支撑光阑,可以有效地抑制光学器件的热效应.强激光通道上采用密封管道,抽真空后充低吸收率气体,可以有效地消除传输介质热效应.共孔径共模式光束控制是全系统光束质量一体化控制的有效方法.

- [ 1 ] 鲜浩,姜文汉.波像差与光束质量指标的关系.杭州:第四届全国激光科学技术青年学术交流会,1997[ Xian H, Jiang W H. Relations between the Beam Quality Factor and Wavefront Aberration. Hangzhou: The Fourth Youth Symposium on Laser Science and Technology, 1997( in Chinese ) ]
- [ 2 ] 苏毅,万敏.高能激光系统.北京:国防工业出版社,2004. 40—45[ Su Y, Wan M. High Energy Laser System. Beijing: National Defence industry Press, 2004. 40—45( in Chinese ) ]
- [ 3 ] Kenneth W B, Bruce A H *et al.* SPIE, 1999, 3706: 196

## 参 考 文 献

· 物理新闻和动态 ·

## 配合“世界物理年”的物理教学活动 ——装甲兵工程学院举办大学物理素养大奖赛

2004年9月30日,为了“迎接世界物理年”,在我校举办了以“热爱物理、欣赏物理、宣传物理”为主题的“大学物理学习素养大奖赛”活动.目的在于弘扬物理的文化价值,倡导一种科学与人文融合的精神,把物理学习和做人联系起来,挖掘物理本身内在的精神价值和育人价值.以此活动,昭示人们重视物理、热爱物理、参与物理,使物理教学从知识型升华为知识与物理精神相结合的综合型教学.

活动题目以物理学科为核心,还旁及文学、艺术、音乐等人文学科.题目类型丰富多彩,通过以下5个环节:概念原理‘必答’、基本素养‘选答’、个人反应‘抢答’、集体合作‘风险’、风采展示‘主观’(笔试和口头表述)来展示.在环节之间,还插有面向全场观众的配乐散文欣赏、物理学与艺术讲解等特别节目.整个活动的安排非常强调氛围渲染、精神熏陶.例如:配乐散文是与“质量”有关的,非常优美,所配合的题目是国际单位制中7个基本量是什么?最后的辩论是播放了《第二次握手》中一段关于原子能武器研制的演讲之后自然地推出引人深思的辩题——科学研究应不应该有道德的限制.

该活动是在容纳500人的大教室进行,参赛选手和观众由我院今年开设大学物理课所有系的学生构成.评委既有来自物理教研室的教师,还有来自语言教研室、外语教研室、政治教研室的专家和教授.比赛是在优美的音乐声中开始的,共历时2小时,气氛热烈活跃,融科学性、知识性、趣味性、刺激性、风险性、人文性、启发性于一体,受到了与会领导和专家的高度肯定和评价.

对于活动,受益最多的还是学生.在活动结束后,教研室对参赛学生作了抽查,了解学生对这次活动的感受,学生的话语真正说明了本次活动的效果.“活动的形式新颖,富有创意,气氛活跃,主要是体现了一种精神,一种风貌.其实学习的动力、兴趣也来源于此,只有有了对知识不断探索的精神,才能真正把学习搞好”;“这次活动有助于改变我院学风,使学风更正、更浓,活动中的基本概念,有助于让学员理解基础课的重要性,同时“物理学与艺术”使同学们改变以往的学习观念,很好地调动学员的积极性,同时整个活动非常隆重,活动形式丰富多样,个别场景设置非常有创意”;“这次活动使我对物理产生了兴趣,增加了许多知识,感觉到物理蕴涵着丰富的人文因素.这样的活动学院应大力支持,广泛开展.不仅在物理方面,在其他方面也应该多搞一些,扩展学员的知识面,调动学员的学习积极性.”总之,整个活动深入人心,倡导了一种新的物理学习理念,营造了一种良好的学习氛围,传播了一种科学精神和人文精神相互交融的精神,提供了一种教学方式和学习方式思考的导向,为今后全面开展多种教学方式实践打下一个坚实的基础.

(装甲兵工程学院 李萍萍)