



·粒子束及加速器技术·

环路热管式光子吸收器的换热可行性*

范庆梅¹, 刘佰奇², 李琦², 黄金印¹, 何平^{2,3}, 张红星¹,
周宇鹏¹, 魏然¹, 李国广¹

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 利用环路热管换热技术对光子吸收器进行换热可以提高光子吸收器的换热效率、减小其结构尺寸, 而且运行时无振动, 是未来高性能加速器中设计光子吸收器的重要技术储备。分析环路热管在光子吸收器上应用时的传热性能, 发现目前环路热管的换热能力完全满足光子吸收器的换热需求, 但热沉的结构、特别是导热距离需要严格优化。利用航天五院 C18 型号环路热管, 优化设计了一台环路热管式光子吸收器样机, 数值模拟其运行时的温度分布, 并实验测试了光子吸收器样机的总体换热能力。

关键词: 环路热管; 光子吸收器; 传热分析; 同步辐射光

中图分类号: TL503.7

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210328

Feasibility study of photon absorber heat extracted by loop heat pipe

Fan Qingmei¹, Liu Baiqi², Li Qi², Huang Jinyin¹, He Ping^{2,3}, Zhang Hongxing¹,
Zhou Yupeng¹, Wei Ran¹, Li Guoguang¹

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Loop heat pipe can be used on the photon absorber to improve its heat exchange efficiency and reduce its structural size, and for vibration-free operation, so it is an important technical reserve for the future design of photon absorbers in high-performance accelerators. The heat transfer performance is analyzed when the loop heat pipe is applied to the photon absorber, the results show that the current heat transfer capacity of the loop heat pipe fully suffice the requirements of the photon absorber, but the structure of the heat sink, especially the heat transfer distance, needs to be strictly optimized. Then, using the type “C18” loop heat pipe made by China Academy of Space Technology, a prototype of the photon absorber heat extracted by loop heat pipe was designed and optimized, the temperature distribution is simulated numerically, and the heat transfer capacity was tested experimentally.

Key words: loop heat pipe, photon absorber, heat transfer, synchrotron radiation light (SR)

光子吸收器是环形加速器的必要部件。在加速器中, 当束流受二极磁铁作用发生弯转时, 会沿切线方向辐射产生较高能量的同步光, 为了避免这些具有高密度热流的同步辐射光照射真空盒对其造成破坏, 需要采用光子吸收器对其热能进行吸收。

常见的光子吸收器一般采用通有冷却水的铜热沉对同步光热负载进行吸收、排出, 从而保护后续的真空盒^[1]。但随着低发射度环形加速器技术的发展, 真空盒越来越小型化、束流能量越来越高, 例如正在建设的第四代北京高能同步辐射光源 (HEPS) 将成为世界上发射度最低的同步辐射光源, 其储存环束流管道内径仅为 22 mm, 而束流能量为 6 GeV、流强 200 mA^[1-2]。这种加速器的真空盒尺寸很小, 但产生的同步光能量很高、热流密度很大, 而且运行时对无振动要求较高, 因此需要使用结构尺寸更小、冷却功率更大、同时还不能产生大的振动的光子吸收器。但是, 使用传统水冷设计光子吸收器时, 水的比热容限制了换热效率, 设计小型化、高换热能力的光子吸收器时会对

* 收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-12-27

基金项目: 中国科学院粒子加速物理与技术重点实验室开放课题 (JSQ2018KF01)

联系方式: 范庆梅, 83804630@qq.com。

通信作者: 刘佰奇, liubq@ihep.ac.cn。

机械加工及焊接方式等带来严峻的挑战^[3-4]。所以改变换热原理——从传统利用冷却介质的热容进行换热,到新的、具有更高换热效率、利用介质液气相变潜热进行换热——是对光子吸收器进行换代升级的新思路和新方向。

采用环路热管技术将同步光的高热流密度从真空盒内引出有明显的优势^[5-6]。该方案利用热管换热介质——氨的液气相变吸热、气液相变放热过程设计循环回路,让工作介质在热端蒸发并传输到冷端冷凝后再回流到热端,产生热量的定向转移。相比常规水冷式光子吸收器,环路热管式光子吸收器的优势包括以下几个方面:(1)尺寸小。相比冷却水方式需要进、出两路水管,热管式光子吸收器仅需要一个单管进入真空盒内,尺寸更小,更易于一体式加工,并且可以减少真空焊缝,降低真空泄露风险;(2)换热效率高。环路热管换热是利用液体蒸发的潜热能,具有更大的换热效率;(3)无振动。环路热管内换热介质的运动是依靠表面结构毛细力产生驱动,相比流动的冷却水,不会产生管路振动,有益于加速器的静态运行。

因此,研究环路热管在光子吸收器上的应用具有着重要的工程价值,是对未来高性能加速器研制的重要技术储备。本文基于第四代高能同步辐射光源储存环的同步光换热需求,通过换热分析和实验测试^[7-8],研究基于环路热管技术设计热管式光子吸收器的可行性。

1 热管式光子吸收器的传热分析

光子吸收器运行时的传热过程可以分3步:(1)同步光打在光子吸收器热沉上;(2)同步光热流通过传导向热沉内部扩散;(3)热管将热沉内表面热量带走。这3个过程对应于3个参数,分别是同步光热流密度 q 、热沉扩散深度 L 以及热管与热沉间的等效换热系数 h 。其中同步光热流参考高能同步辐射光源储存环的同步光参数:其热流密度 q 平均值为 $13\ 300\ \text{W}/\text{cm}^2$,最大值为 $15\ 500\ \text{W}/\text{cm}^2$;同步光平均宽度 $0.32\ \text{mm}$ 。下面对这3个参数分别进行敏感性分析。分析模型如图1所示,热沉材料为铬钴铜,环境温度设为 $25\ ^\circ\text{C}$ 。

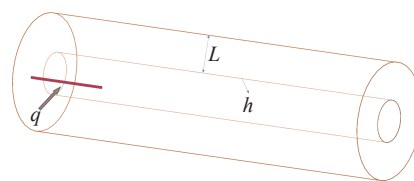


Fig. 1 Simulation model for thermal analysis
图1 热分析模型示意图

1.1 对同步光热流密度的热敏感性分析

热管与热沉间的等效对流换热系数 h 取航天五院C18型号环路热管的测试数值 $10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,热沉厚度 L 取为 $5\ \text{mm}$,考虑HEPS光源的最大热流密度为 $15\ 500\ \text{W}/\text{cm}^2$,按照常规光子吸收器设计经验,将受光面倾角取为 10° ,则光斑在受光面上产生的热流密度最大约为 $2700\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。由此,计算 $500\sim 4000\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的六组数据,待温度分布平衡后,光斑处最高温度与热管侧最高温度随同步光热流密度增大的关系如图2所示。可以看出,光斑处的最高温度与热管侧的最高温度均随着同步光热流密度的增大而线性增大,但即使局部热流密度高至 $4000\ \text{W}/\text{cm}^2$,热管侧的最高温度也小于 $100\ ^\circ\text{C}$,在环路热管的正常运行范围以内。光斑处最高温度为 $205.3\ ^\circ\text{C}$,满足铬钴铜热沉的材料物性要求。

1.2 对热沉厚度的热敏感性分析

按照HEPS光源参数取最大热流密度 $15\ 500\ \text{W}/\text{cm}^2$,对应光子吸收器受光面承受的热流密度为 $2700\ \text{W}/\text{cm}^2$,热管与热沉间的等效对流换热系数取 $10\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。按照常规的热沉厚度范围计算了 $2\sim 6\ \text{mm}$ 的5组数据,在温度分布平衡后,光斑处最高温度与热管侧最高温度随热沉厚度增加的关系如图3所示。可以看出:在该热沉厚度

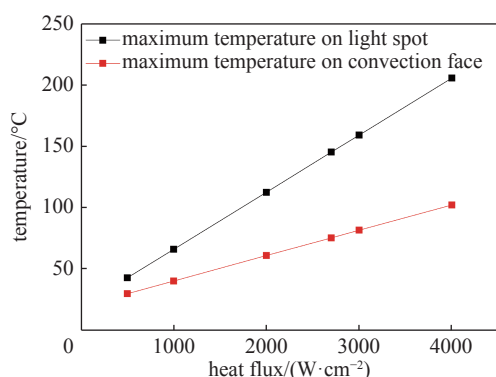


Fig. 2 Effect of SR heat flux on temperature distribution
图2 同步光热流密度对温度分布的影响

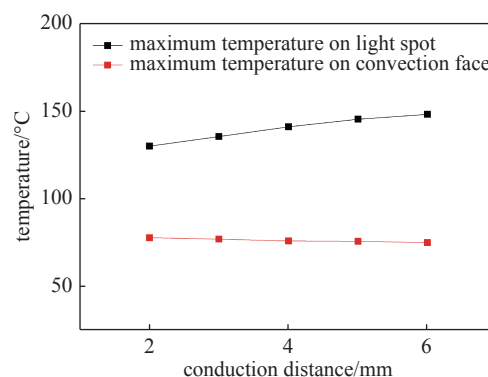


Fig. 3 Effect of heat sink depth on temperature distribution
图3 热沉扩散深度对温度分布的影响

范围内,光斑处的最高温度与热管侧的最高温度受到的影响不大,其中光斑最高温度在 (140 ± 10) ℃,热管侧最高温度在 (76.5 ± 1.5) ℃。另外,可以看出,随着热沉厚度增加,光斑温度随之上升,热管侧温度随之下降。光斑处温度上升是因为随着导热距离的增加,相同传热量需要的温差更大,而热管侧温度降低是因为随着导热距离的增加,热流扩散使得局部热流密度降低。因此,对于相同的同步光热流密度,要降低热沉温度,可以通过减小热沉厚度或者增大热扩散能力两个方面进行。

1.3 对换热系数的热敏感性分析

最后,分析热管与热沉间的等效对流换热系数 h 对光子吸收器温度分布的影响。同样取光子吸收器受光面承受的热流密度为 2700 W/cm^2 ,取热沉厚度 $h=4\text{ mm}$ 。按照航天五院设计生产环路热管的经验,环路热管的等效对流换热系数为 $(10\ 000\pm 2500)\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$,因此本部分分析了换热系数在 $5000\sim 15\ 000\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 之间时对热沉温度的影响。计算结果如图4所示,可以看出,随着环路热管的等效对流换热系数的增大,光斑最高温度与热管侧最高温度均随之降低。该结果表明,环路热管的换热性能对光子吸收器热沉温度影响很大,性能优异的环路热管可以有效降低光子吸收器的热沉温度。但按照HEPS的同步光热流密度分布,即使等效对流换热系数小到 $5000\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 时也可以满足其运行要求。说明使用环路热管设计未来高性能光子吸收器依然有很大的应用空间。

综合以上分析可以知道,加速器同步辐射光的能量总功率不大,但热流密度极高。由于热沉材料的导热性能限制,局部高热流密度传至吸热侧时很难扩散到足够低的热流密度,因此,设计光子吸收器时需要在受光侧尽量降低受光面接收到的热流密度,并严格优化热沉的导热距离,而吸热侧所需的换热能力远小于环路热管的换热功率,设计时对热管毛细芯的性能要求不高。

2 环路热管式光子吸收器设计与换热测试

2.1 环路热管式光子吸收器设计及换热模拟

根据光子吸收器的换热分析结果,按照HEPS的同步光能量吸收需求,设计了如图5所示的环路热管式光子吸收器。其特点主要包括:(1)热沉本体采用热导率高、机械性能好的铬铅铜材料一体加工而成,其法兰密封面以下无任何焊缝或接口,从而保证光子吸收器在加速器强辐射运行环境中不会出现真空漏孔;(2)同步光受光面采用锯齿结构,通过倾斜受光面降低光子吸收器的受光热流密度,受光面与同步光的倾角为 8.94° ,锯齿高度 3.1 mm ,齿峰与内测换热面的距离为 5.24 mm ;(3)光子吸收器热管选用航天五院C18型号环路热管进行钎焊连接,等效对流换热系数为 $10\ 000\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。系统运行时,当同步光打到热沉上后,热沉温度上升并扩散到热沉内表面;钎焊在热沉内表面的环路热管蒸发器毛细管吸收热量后,液态换热工质受热蒸发;蒸发后的气态换热工质沿管路流到冷凝

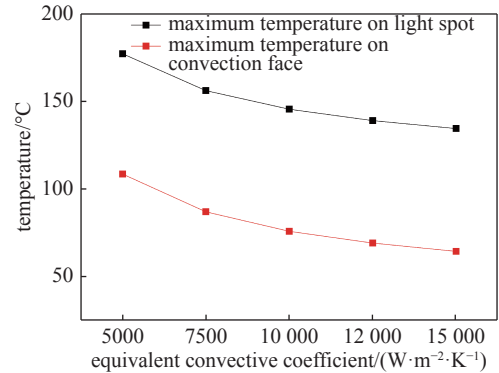


Fig. 4 Effect of heat transfer coefficient of the heat pipe on temperature distribution

图4 热管等效对流换热系数对温度分布的影响

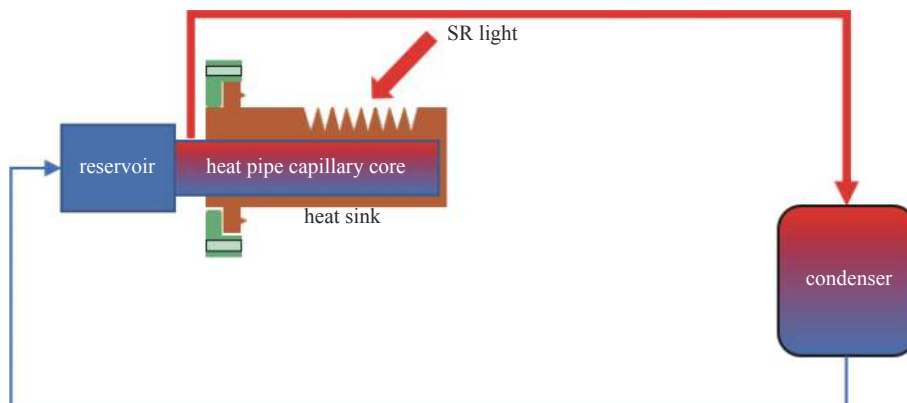


Fig. 5 Diagram of the photon absorber using loop heat pipe

图5 环路热管式光子吸收器示意图

器内散热凝结;凝结后的液态换热工质再沿管路流回环路热管储液器。如此循环往复进行换热。

2.2 热管式光子吸收器热分布模拟

按照该结构,模拟入射同步光宽度 0.3 mm,照射范围为锯齿面总长 36.5 mm,同步光总功率为 200~2000 W,受光子吸收器锯齿面倾斜增大受光总面积后,照射到光子吸收器上受光面光斑位置的热流密度对应为 283.8~2838 W/cm²;在热管侧,取热沉内接触面的对流换热系数为 10000 W/(m²·K)进行模拟,模拟结果显示锯齿结构的峰尖位置的温度最高,对应范围为 47.2~247.4 °C。图 6 是按照 HEPS 光子吸收器最大承受的热流密度 2700 W/cm² 计算(对应同步光总功率为 1 902.5 W)时的温度分布结果。可以看出,锯齿结构的峰尖位置距离环路热管最远,温度最高,但随着导热距离增加,到了锯齿结构根部,温度即可降到 150 °C 以下。因此该环路热管式光子吸收器的换热能力满足 HEPS 光源的同步光吸收需求。

2.3 热管式光子吸收器换热性能测试

图 7 是加工完成的环路热管式光子吸收器,包括同步光热沉、热管毛细芯、储液器、冷凝器、气液管路等部件。加工完成后,本部分对该光子吸收器换热性能进行了实验测试。因为加速器产生同步光热流密度太高,在加速器线下进行实验测试时无法用其他类似加热源进行替代,本部分只测试了该光子吸收器总的换热能力。测试方案如图 7 所示,使用两片陶瓷加热片贴在吸收器外侧,每个加热片的功率为 100 W,模拟同步光的总功率。然后对储液器入口(T₁)、储液器外壳(T₂)、同步光热沉(T₃)、蒸发器出口(T₄)、以及冷凝器出口(T₅)几个位置进行温度监测。其中,储液器入口温度和冷凝器出口温度可以反映环路热管的液相起始温度,储液器外壳可以反映光子吸收器热沉附近实际的环路热管液相温度,同步光热沉温度可以反映实际的加热温度,蒸发器出口温度可以反映环路热管的气相温度。

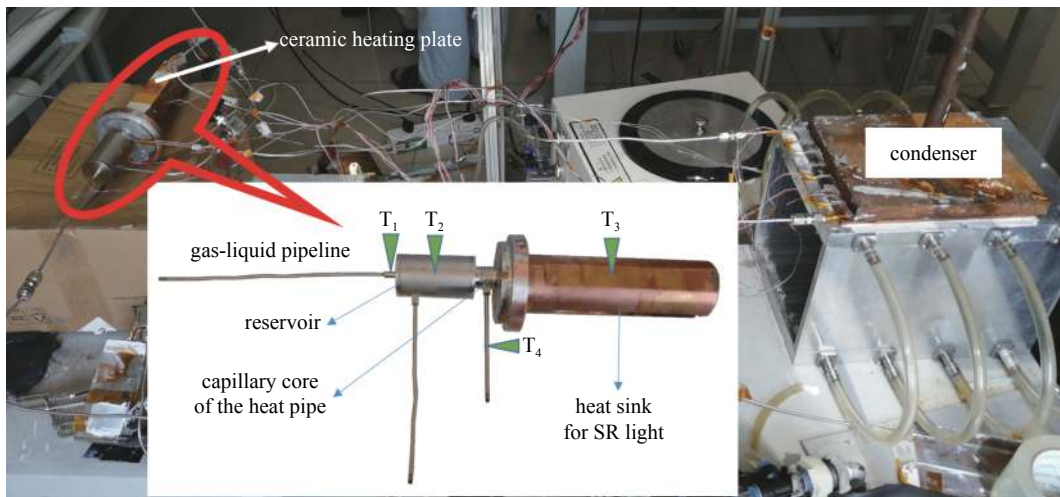


Fig. 7 Photo of the photon absorber using loop heat pipe and its test site

图 7 环路热管式光子吸收器样品照片及测试现场

实验时保持冷凝器恒温在 23 °C,然后先后启动两片陶瓷加热片,测试的温度曲线如图 8 所示。可以看出,在对第一个陶瓷加热片(100 W)启动加热后,同步光热沉开始升温,其内部的环路热管随之运行换热,约 15 min 后,热沉温度达到稳定状态,运行温度约为 33 °C,此时环路热管产生的气相温度(T₄)为 32 °C,经冷凝器冷凝后,转变为约 24 °C 的液相。随后启动第二个陶瓷加热片(100 W),同步光热沉继续升温,约 20 min 后,热沉温度重新稳定,运行温度约为 43 °C,与模拟结果相近,此时环路热管产生的气相温度(T₄)为 38 °C,经冷凝器冷凝后,转变为约 25 °C 的液相。该测试验证了该环路热管式光子吸收器的稳定运行能力。

B: copy of steady-state thermal temperature
type: temperature
unit: °C
time: 1
2021/4/15 17:01

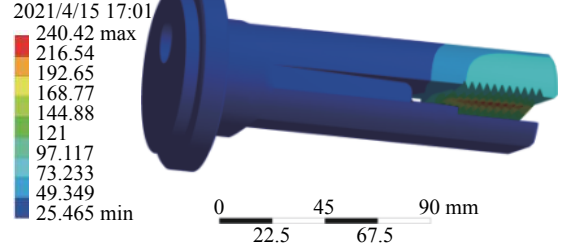


Fig. 6 Temperature distribution of the photon absorber calculated by simulation

图 6 数值模拟光子吸收器温度分布结果

3 结 论

在环形加速器中,针对其真空盒小型化、高束流能量、低振动等新的发展方向对光子吸收器提出的高性能需求,本文提出了使用环路热管代替传统循环水冷设计光子吸收器的新方向。分析了环路热管式光子吸收器的换热性能,发现环路热管的换热能力完全满足光子吸收器的换热量需求,但是由于热沉材料的导热性能限制,同步光产生的高热流密度会在热沉表面产生局部高温,因此需要严格优化热沉的导热距离。最后,优化设计了一台环路热管式光子吸收器,模拟了其受同步光照射时的温度分布,结果发现,该环路热管式光子吸收器满足高能同步辐射光源储存环的同步光吸收需求。加工了一台环路热管式光子吸收器样机,并进行了换热性能测试实验,结果验证了该环路热管式光子吸收器的稳定运行能力。

参考文献:

- [1] 姜晓明,王九庆,秦庆,等.中国高能同步辐射光源及其验证装置工程[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2014,44(10):1075-1094. (Jiang Xiaoming, Wang Jiuling, Qin Qing, et al. Chinese high energy photon source and the test facility[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2014, 44(10): 1075-1094)
- [2] 焦毅,徐刚,陈森玉,等.衍射极限储存环物理设计研究进展[J].强激光与粒子束,2015,27:045108. (Jiao Yi, Xu Gang, Chen Senyu, et al. Advances in physical design of diffraction-limited storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 045108)
- [3] 陈丽萍.上海光源储存环光子吸收器结构与研制[J].真空科学与技术学报,2009,29(5):546-551. (Chen Liping. Photon absorber development for storage ring of Shanghai synchrotron radiation facility[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(5): 546-551)
- [4] 蒋迪奎,陈丽萍,殷立新.SSRF光子吸收器的研制[J].真空科学与技术学报,2002,22(3):167-172. (Jiang Dikui, Chen Liping, Yin Lixin. Development of SSRF photon absorbers[J]. Vacuum Science and Technology, 2002, 22(3): 167-172)
- [5] 王录,苗建印,张红星.制冷机与深冷环路热管集成系统传热特性试验研究[J].航天器工程,2016,25(3):63-68. (Wang Lu, Miao Jianyin, Zhang Hongxing. Investigation on thermal characteristic of integrated system of pulse tube coolers with cryogenic loop heat pipes[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(3): 63-68)
- [6] Suthar K J, Lurie, Alexander M, et al. A discussion on utilization of heat pipe and vapour chamber technology as a primary device for heat extraction from photon absorber surfaces[C]//9th Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation. 2016.
- [7] 陈佳元,余文峰,程祖海.强激光热管冷却镜的数值研究[J].强激光与粒子束,2008,20(5):710-714. (Chen Jiayuan, Yu Wenfeng, Cheng Zuhai. Numerical study on outside cooling mirror with heatpipe[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 710-714)
- [8] 赵颖,何俊,汪林,等.流强探测器发热分析及改善方法[J].强激光与粒子束,2018,30:085106. (Zhao Ying, He Jun, Wang Lin, et al. Thermal analysis and solutions of new parametric current transformer in BEPC II [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 085106)

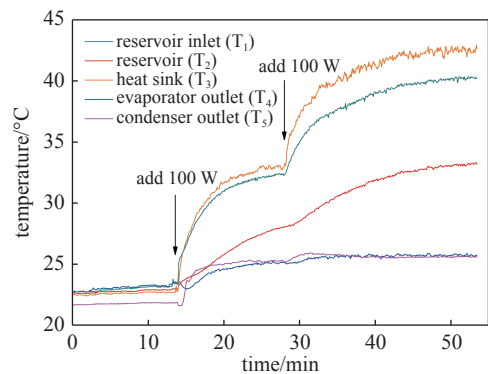


Fig. 8 Temperature curve of the photon absorber using loop heat pipe in heating experiment

图 8 热管式光子吸收器换热测试温度曲线