

潜艇排气系统的红外抑制

王小川, 杨立

(海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:常规潜艇通常在通气管状态航行时通过柴油机发电机组进行充电,抑制潜艇排气系统的红外特征,对于提高潜艇隐蔽性有着重要的意义。介绍了国内外舰船排气系统的冷却降温措施、排气系统设计的理论研究,以及一维流体系统仿真软件 FLOWMASTER 在排气系统设计中的应用。排气系统的降温设计应同时考虑排气阻力和噪声的降低,使用 FLOWMASTER 软件可方便地进行排气系统的总体设计。

关键词:排气系统;红外抑制;FLOWMASTER

中图分类号:TK413.4⁺4 **文献标识码:**A

Infrared Suppression of Submarine Exhaust System

WANG Xiao-chuan, YANG Li

(Academy of Ship and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Conventional submarine usually generates electricity by dynamotor when snorkeling. Suppressing infrared signature of exhaust system is important to enhance the stealth performance. Measures and designs to cool the ship exhaust system and the application of one-dimensional software FLOWMASTER are introduced. The decrease of resistance and noise should be considered. FLOWMASTER can be used for whole design of exhaust system conveniently.

Key words: exhaust system; infrared suppression; FLOWMASTER

1 引言

隐蔽性是潜艇的基本特征,但对于常规潜艇,由于柴油发电动力装置必须在通气管状态下为蓄电池充电。此时柴油机排出的高温废气使潜艇周围的海水温度升高,使得这部分海水的红外热特征与海面背景产生明显的红外辐射差异。目前很多舰载、机载高灵敏度的红外探测仪,可以捕捉到明显的红外辐射差异^[1],以此对潜艇发动攻击。这就使得潜艇的隐蔽性大大降低,生存能力明显减弱。理论研究表明,在海面水温有 0.001℃ 的温差时所产生的辐射差异已可满足红外反潜探测的需要。当舰船尾流温度与周围海水的温差达到 0.02℃ 时,探测器对尾流目标的发现距离、识别距离、认清距离^[2]分别为 8.84km, 3.88km, 2.74km。

红外隐身技术最早在军用飞机上得到应用,舰船的红外隐身起步较晚^[3],但随着现代红外探测技

术的发展和反潜技术的不断推进,机载前视红外装置能探测到水下 40 m 深处的潜艇潜艇^[4]。排气系统排出的高温烟气所带来的海面局部温度升高、红外热特征的明显变化,对潜艇隐身提出了新的挑战,各国纷纷采用各种隐身技术,提高潜艇的隐身性能。潜艇水下排气系统如图 1 所示。

通气管航态下,水下排气口上方海面的局部范围内的明显突出的红外热特征是潜艇在此航态下暴露目标的关键所在,因此必须设法降低排出废气的温度,在废气排出艇体之前降到一定程度,降低高温废气对海面温度的影响^[5]。通过对潜艇排气系统冷却降温,降低高温烟气的出口温度,达到常规潜艇红外隐身的要求,增强潜艇隐蔽性,在红外对抗中能

作者简介:王小川(1985-),男,硕士生,主要从事舰船红外隐身技术的研究。E-mail:wangxiaochuan08@163.com

收稿日期:2008-10-06

有效地保存自己,具有重要的现实意义。

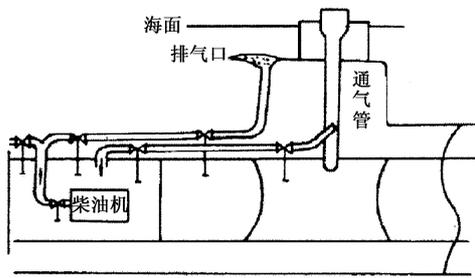


图1 潜艇水下排气系统示意图

2 国外排气系统降温冷却措施

国外各型舰船都采取了具体的措施冷却排气系统管壁及废气,降低了排气系统高温烟气的温度,有效抑制了红外辐射,达到了一定的隐身效果^[6-9]。

2.1 空气冷却

空气冷却多应用于舰船水上排气系统。冷空气从不同的缝隙进入排气管段,被管内高温气体引射,为排气管壁内表面的金属提供了一个冷空气的薄膜冷却层,使排气管壁面与高温烟气隔离,减少了高温烟气与壁面的对流换热,降低了壁面温度,有效抑制了壁面的红外辐射。英国“支持者”(Upholder)级(2400型)常规潜艇柴油机排气管使用了这种空气冷却设备,大大降低了该艇的红外特征^[10]。

2.2 冷却水冷却

(1)对流水冷。包括设置冷却水套、水夹层排气管、水浴式废气净化箱等常规冷却措施。通过冷却水与排气管壁的对流换热,达到冷却目的。几乎所有的舰船上都装备有一种或几种这类冷却设备。

(2)喷淋水冷。喷淋冷却水与排气直接接触,利用水的汽化潜热(高达 2257kJ/kg),对排气进行大幅度降温。德国 209 级常规潜艇上使用了一种水冷喷射消声器,这种系统通过喷射水雾,降低排气温度,抑制红外辐射,同时增大对排气噪声的衰减^[11]。日本海上自卫队“亲潮”(Oyashio)级常规潜艇柴油机排气系统上装备了一个海水喷射腔,采用海水直接喷射,能将排气温度由 500℃ 降至 60℃。

(3)水下排气。近年来,水面舰艇出于越来越严格的红外隐身性能的需要,也大量研究应用了水下排气的方式。Bolhm-Voss 公司和 MTU 公司已经在研制舰艇柴油机的水下废气排放系统。美国洛克希德公司研制的“海影”号护卫舰采取将发动机排气管路安装在吃水线以下来降低排气系统热量的散发,避免在船体表面形成明显的红外热点^[12]。

2.3 其他措施

除了空气冷却和对流冷却这两种基本的冷却方式外,各国还研究发展了其他方式的排气系统降温措施。

法国的“拉菲特”(LaFayette)级护卫舰采取独特方法,排气烟囱等热点部位用增强玻璃钢制造,不易产生红外辐射,并涂以一种低发射率特殊涂料,并对发动机排气口和玻璃钢排气管做了精细的隔热处理,有效抑制了红外辐射。德国 MEKO 舰改进了排气管出口的几何形状,使排气的扩散迅速均匀化,从而降低了总的红外辐射级。

3 国内排气系统冷却技术研究

随着国防建设的需要,国内开展了若干关于红外对抗、红外特征模拟以及提高舰船红外隐身性能的研究^[13-15],取得一系列的成果。

3.1 排气消声器

消声器是舰船排气系统重要的组成部分,不仅起到了降低噪声的作用,而且在降低排气温度方面也发挥了重要的功用。

1995年,海军工程大学的王永生分析了德国 MTU396SB83 和 MTU396SE84 两型潜用废气涡轮增压柴油机的排气冷却消声器的功用后^[16],指出该型消声器在降低排气噪声和 underwater 排气所激起的水噪声的同时,较好地降低了废气温度,改善了水下排气时柴油机的工作条件。

2003年,哈尔滨工程大学柳贡民、黄亮、贺林等人设计研究了水喷淋型排气降温消声器^[17-18],以抗性结构消声器为对象,在内部安装了多个喷头,喷入雾化冷却水,利用水的汽化潜热降低排出废气的温度。他们利用流体力学软件进行了消声器内部流场及温度场的分析计算,通过调节喷嘴的数量和压力,可以使排气温度由 420℃ 降低到 120 ~ 320℃。并通过模拟实验,证明通过控制喷水量,可使得排气温度最低降到 60℃,喷入的冷却水不但没有增大排气阻力,反而使其略微变小,并且对排气噪声也有一定的抑制作用。

3.2 喷淋冷却

为克服常规潜艇经常上浮充电、增加暴露率的弱点,各国海军还研究了不依赖空气的 AIP 动力装置。AIP 系统排出的高温废气也需要经过冷却,为此海军工程大学的贺国等针对封闭式循环柴油机(CCD) AIP 系统^[19],分析对比了横流式、并流式、逆流式喷淋冷却方式,并对实际选用的横流式喷淋冷

却器进行了传热分析。从单个液滴传热模型出发,采用分层计算方法建立了喷淋冷却传热模型,并用 Matlab 语言编程计算了各种工况下的冷却效果,实验结果表明该传热模型能很好的反映喷淋冷却效果。

海军工程大学热工教研室也开展了排气系统红外抑制的相关研究,袁江涛、杨立等针对动力机械排气系统内喷雾冷却的复杂过程,用 Euler-Lagrange 方法对气相和液相建立了模型^[20-21],分别对气流内顺流和逆流喷雾过程进行了三维仿真的数值模拟,结果表明:顺流和逆流喷雾均使气相速度场内产生速度亏损,气相温度场内产生了温度亏损,气体出口压力变化不大;在相同条件下,雾滴在逆流喷雾时的运动轨迹比顺流喷雾时的长,在气流内停留时间长,导致逆流喷雾比顺流喷雾对气相速度场和温度场的影响大。

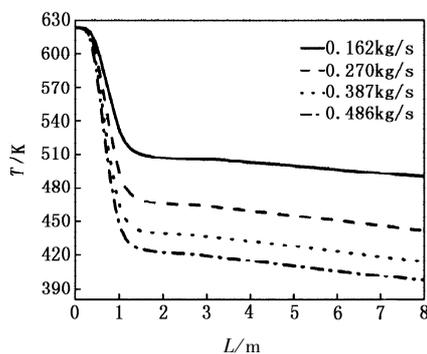


图2 气相温度随水流量的变化沿轴线的分布

气相温度在随水流量的变化沿轴线的分布如图2所示^[22]。当在烟道内布置18个喷嘴,水流量为0.486 kg/s时,排气出口温度已从喷雾降温前的623 K降至397 K。可见,喷雾降温技术可显著降低动力排气系统的排气温度,在喷嘴雾化参数一定的条件下,水流量越大,排气出口温度越低,但温降幅度越小。

3.3 水下排气

水下排气也是一种很好的排气系统红外抑制方式,近年来已经在舰船上得到使用。

华中科技大学的孟清正等^[23]分析比较了船用柴油机的各种排气方式后,认为水下排气是军用高速艇柴油机理想的排气方式,并通过实验研究了排气对螺旋桨的影响、艇底排气出口的位置选择和艇的阻力变化等三个方面,结果表明水下排气可作为高速艇可用的排气方式。

由华中科技大学和中船重工701所联合研究提

出的负压区排气技术^[24],利用潜艇指挥台围壳附近流场的水动力效应所形成的“负压区”布置柴油机通气管排气口,并在同一类型艇上进行了新旧两种排气口(负压区排气口和原鸭嘴型排气口)的对比试验。结果表明采用新的“负压区”排气口后,柴油机的排气背压在各工况下均有明显降低,降低幅度为(3.3381~8.610) kPa,排气温度在各工况下也均有明显降低,降温幅度可达10~23℃。

4 排气系统总体设计

排气系统是个复杂的系统,其最优化设计中要考虑到很多因素,如噪声的控制、排气温度的降低和机械性能的最大化等,越来越需要设计人员从总体上进行优化设计。

1996年,英国南安普顿大学振动与噪声研究学会 Davies 等人,认为进排气系统的设计应找到最佳的切合点,既使噪声降到最低,又使发动机输出功率和燃油效率达到最大^[25]。他们认为进排气系统的设计步骤应包括:首先对系统的每个几何元素分别建立模型,然后用适当的原则将单个元素组合起来,再在一定的操作环境下对系统进行进一步的修改,最后通过实验对所得的系统模型进行评估。

排气系统模型越来越需要从整体上进行设计研究,FLOWMASTER 可以很好的实现这个功能。

FLOWMASTER 是 FLOWMASTER 公司基于流体网格基本原理开发的一维流体系统仿真软件,有强大的数据库管理能力^[26]。内含可压流体稳态和瞬态分析模块,可获得模型各处压力、温度、噪声等的的数据,是车船排气系统仿真建模的理想工具。

2002年,美国汽车工程师协会(society of automotive engineers, SAE)利用 FLOWMASTER 软件,对汽车的排气系统整体建立模型^[27],包括排气净化器、消声器、弯管和排气尾管等部件,如图3所示。分析研究时既考虑到降低排气阻力损失,最大限度的降低排气噪声,降低废气出口温度,又确保良好的机械性能,从整体上对排气系统进行优化设计。

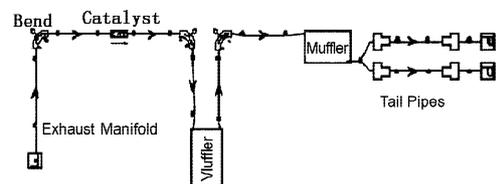


图3 FLOWMASTER 排气系统模型

用一维方法建模,不同于三维 CFD(计算流体力学)方法,FLOWMASTER 不需要建立数百万个网

格,只需要根据经验公式进行计算,简化了计算方法,节省了计算时间,便于设计人员综合考虑各个因素,实现最优化方案设计。在美国 ArvinMeritor's Columbus 技术中心和华盛顿技术中心的实验研究表明,软件模拟与实际测量结果吻合较好。

5 分析与总结

潜艇的红外隐身已经成为一个重要的研究课题,国内对此研究颇少,也没有从整体上设计排气系统。综合各文献,我们将获得以下启示:

(1)随着军用光电技术和红外探测技术的快速发展,潜艇排气系统的红外抑制应当作为潜艇隐身的重要方面,应当从理论和实际上进行全面的设计。

(2)排气系统的红外抑制应当从宏观上考虑高温烟气的排气噪声、阻力和温度降低等方面,以确保在温度降低的同时,不影响机械效率和噪声控制。国内外从宏观上对排气系统的研究还比较缺乏,排气系统宏观的研究具有一定的价值。

(3)利用流体系统仿真软件 FLOWMASTER,可以简化计算,方便设计人员综合比较各种模型,尝试各种降温措施,进行最优化选择,确定最为合适的排气系统冷却模型。

参考文献:

- [1] D A Vaitekunas, K Alexan, et al. Naval threat and countermeasures simulator [J]. Proc. SPIE, 1994, 2269: 172 - 185.
- [2] 张晓怀,陈翮,杨立. 潜艇热尾流红外特征分析与计算[J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1054 - 1057.
- [3] A M Birk, W R Davis. Suppressing the infrared signatures of marine gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1989, 111: 123 - 129.
- [4] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004, 6: 4 - 6.
- [5] 贺林,柳贡民,黄亮. 降低柴油机排气系统的温度在舰船红外隐身中的应用[J]. 柴油机, 2005, (增刊): 351 - 361.
- [6] H M Aschleijpen, F P Needle. Ship exhaust gas plume cooling [J]. Proc. SPIE - 54312004: 66 - 76.
- [7] D A Vaitekunas, K Alexan, et al. SHIP/NTCS: a naval ship infrared signature countermeasure and threat engagement simulator [J]. Proc. SPIE, 1996, 2744: 411 - 424.
- [8] F P Neele, W Jong. Prewetting systems as an IR signature control tool [J]. Proc. SPIE, 2002, 4718: 156 - 163.
- [9] Ugur Kesgin. Study on the design of inlet and exhaust system of a stationary internal combustion engine [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46 (12): 2258 - 2287.
- [10] 中国船舶信息中心. 现代海军武器装备手册[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
- [11] 朱英富,张国良. 舰船隐身技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2003, 9: 437 - 447.
- [12] 李海燕,何友金,朱敏. 水面舰艇红外隐身技术[J]. 红外技术, 2004, 26(2): 29 - 32.
- [13] 陈翮. 海面舰艇红外隐身效能评估[J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 335 - 337.
- [14] 袁江涛,杨立. 现代舰船红外辐射及其控制策略分析[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 943 - 947.
- [15] 寇蔚等. 一种舰船红外特征的动态模拟方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(2): 148 - 152.
- [16] 王永生. 常规潜艇废气涡轮增压柴油机排气冷却消声器的功用分析[J]. 海军工程学院学报, 1995, 3: 48 - 53.
- [17] 贺林. 水喷淋消声器设计与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
- [18] 黄亮. 水喷淋消声器排气冷却效果及阻力特性仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.
- [19] 贺国,赵建华,陈国钧,等. 闭式循环柴油机排出气体喷淋冷却传热模型及实验关联研究[J]. 内燃机工程, 2003, 24(1): 75 - 80.
- [20] 袁江涛,杨立等. 舰船发动机排气管内顺流喷雾降温的CFD分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 待发表.
- [21] 袁江涛,杨立,等. 高温高速气流逆流喷雾冷却的数值模拟与分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 待发表.
- [22] 袁江涛,杨立,等. 机动军事目标动力排气系统喷雾降温的三维仿真系统仿真学报[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 330 - 334.
- [23] 孟清正,徐国华,李国佩. 军用高速艇主柴油机水下排气方式的试验研究[J]. 船海工程, 2002, 6: 27 - 29.
- [24] 李四娣,张建华,俞强,等. 潜艇负压区排气技术实艇应用对比试验研究[J]. 武汉造船, 1999, 5: 16 - 18.
- [25] P. O. A. L. DAVIES. Piston engine intake and exhaust system design [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 190(4): 677 - 712.
- [26] 张光鹏,许诺,等. Flowmaster 在暖空调中的应用[J]. 制冷与空调, 2006, 3: 34 - 36.
- [27] Ltd Roger J, Stephen Massy, Paul S Williamson. Modelling exhaust systems using one-dimensional methods [M]. Michigan: Arbin Meritor SAE 2002 World Congress Detroit, 2002, 1.