

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.010

独立式散热舱冷却空气侧流动特性试验研究

郭 震, 刘震涛*, 傅佳宏

(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对独立式散热舱与传统轴向散热舱在布置形式、风扇与多个散热器之间的匹配关系、散热舱内部流场分布等方面差异很大的问题,开发了独立式散热舱模拟试验系统,对具有不同散热器安装倾角和安装位置的独立式散热舱进行了试验,利用测压管、叶轮风速仪等测量了不同工况下散热舱流动阻力、散热器表面风速分布等流动特性,计算分析了风速分布相对不均匀性系数及散热舱匹配特性曲线。研究结果表明,散热器倾角在 30° 以内时,随着角度增大,散热器流动阻力减小,表面风速分布更不均匀;散热器由对置布置改为垂直布置时,散热器流动阻力增大,表面风速分布更不均匀;风扇与散热舱的匹配区域为风扇压升小、气体流量大的区域。

关键词:独立式散热舱;安装角度;安装位置;流动阻力;流动不均匀性;匹配

中图分类号:TH39;U464.138

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0298-05

Experimental study on air flow characteristics of detached cooling system

GUO Zhen, LIU Zhen-tao, FU Jia-hong

(Power Machinery & Vehicle Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the great differences between the detached cooling system and the traditional axial cooling system in aspects like system arrangement, matching relationships between the fan and radiators, the flow field distribution and so on, the detached cooling test bench was designed. Experimental study on the detached cooling system with different radiators' installation angle and position was carried out on the new test bench. Dynamic characteristics like flow resistance and air speed distribution were measured by piezometer tubes and impeller anemometers. Relatively uneven coefficient of the air speed distribution and system matching curve were calculated and analyzed. The results indicate that when the radiator installation angle is within 30° , with the angle increasing, radiator flow resistance decreases and air speed distribution on the radiator surface is more uneven. When the position relationships between radiators change from opposed form to vertical form, radiator flow resistance increases and air speed distribution is more uneven. The matching area between the fan and the detached cooling system locates in the area where the fan pressure is low and the air flow is large.

Key words: detached cooling system; installation angle; installation position; flow resistance; flow nonuniformity; matching

0 引 言

目前绝大多数工程机械依然采用将散热系统与发动机布置在一个舱室内的传统布置方式。这种方式不仅迎风冷却效果不明显,而且动力舱内部流动阻力很大,散热器之间流动与传热的相互干扰比较严重,再加

上发动机、变矩器以及液压系统等散热负荷很大,整个散热系统的环境条件十分恶劣^[1]。随着车辆冷却技术的发展,把多个散热器组合起来形成一个独立的舱室以加强冷却、增加散热器散热面积,已成为工程机械散热系统的一种发展趋势^[2]。

独立式散热系统存在着多种布置形式。Jörg Soldner等^[2]提出了一种散热器环绕离心式风扇布置的独

收稿日期:2015-12-01

作者简介:郭 震(1992-),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事发动机热管理方面的研究。Email:GZ654683601@126.com

通信联系人:刘震涛,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:Liuzt@zju.edu.cn

立式散热系统,该系统散热能力强,风扇功耗小、噪声低,并且布置十分紧凑。韩松等^[3-4]提出了一种立方体式独立式散热舱,即吸风式风扇和散热器分别布置于立方体舱的一个面上,该系统可以利用电控设备实现每个散热器的单独控制进而提高散热效率。上述形式的独立式散热舱在布置上与传统串联式散热舱差别很大,其风扇与散热器的位置关系、舱体内部流场分布情况等都发生了新的变化。关于这些变化已有不少学者进行了研究。Ian J. Kennedy 等^[5]通过仿真和试验两种方法对比研究了散热器相对风扇倾斜布置对冷却模块散热能力的影响,结果表明倾角在 30° 以内时倾斜对冷却模块的散热能力有很微弱的提高。Haruaki Kanematsu^[6], Kim Man-Hoe^[7] 等研究发现,在散热器均匀气侧入口条件下,当散热器迎风面与冷却空气流动方向之间超过一定夹角之后,其流动阻力开始急剧上升。Hallqvist Thomas^[8]通过数值仿真方法模拟车用散热器模块的实际运行环境,研究了各个部件对其流动与传热的影响。

上述文献对冷却模块相对风扇倾斜布置,冷却模块与来流风速之间存在夹角等问题进行了研究,但这些研究都是基于散热系统的某些模块进行的,对整个系统的影响并未说明。

为了解独立散热系统冷却空气侧流动特性,并为实际工程应用提供指导和理论依据,本研究开发独立式散热舱模拟试验系统,并将基于该系统研究不同工况下独立式散热舱流动阻力和流动不均匀性的变化规律,散热器安装角度、安装位置等因素对散热舱气侧流动特性的影响以及风扇与散热舱的匹配关系。

1 独立式散热舱流动特性实验

1.1 独立式散热舱模拟试验系统

本研究设计的独立式散热舱模拟试验系统如图 1 所示,该系统主要包括舱体模块、散热器模块、风扇模块、变频电机模块、数据采集模块等,其中散热舱在结构上呈立方体布置,即风扇和散热器分别安装于六面体舱的一个面上,中冷器和水箱散热器呈对置关系布置,二者分别位于风扇的左右两侧,散热舱结构具体分布如图 2 所示。为方便以后系统可视化研究,该系统舱体搭建材料选用了透明度较高的亚克力板材,立方体舱的尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 1 000 mm,风道尺寸为 600 mm × 600 mm × 900 mm。系统风扇为吸风式风扇,风扇直径为 $\phi 650$ mm,共有 9 片叶片均布且叶尖有风扇环连接固定,风扇由变频电机通过皮带轮驱动。系统水箱散热器芯子尺寸为 820 mm × 644 mm × 56 mm,芯部管高度 2 mm,翅片高度 7.5 mm;中冷器芯子尺寸为 800 mm × 600 mm × 50 mm,芯部管高度 10.1 mm,翅片高度 8.9 mm。

动。系统水箱散热器芯子尺寸为 820 mm × 644 mm × 56 mm,芯部管高度 2 mm,翅片高度 7.5 mm;中冷器芯子尺寸为 800 mm × 600 mm × 50 mm,芯部管高度 10.1 mm,翅片高度 8.9 mm。

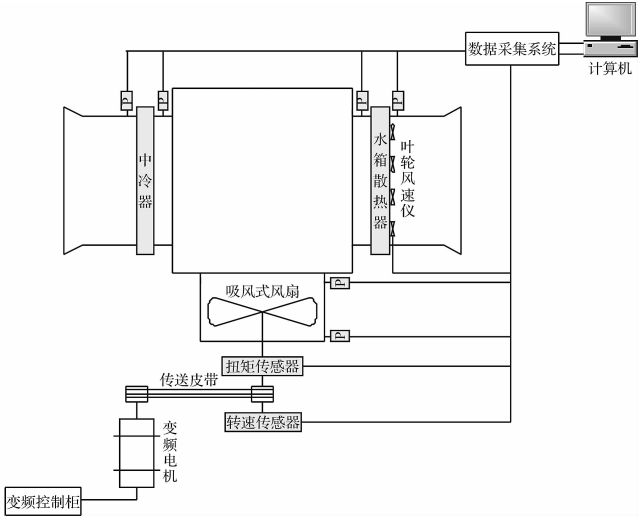


图 1 独立式散热舱模拟试验系统俯视示意图

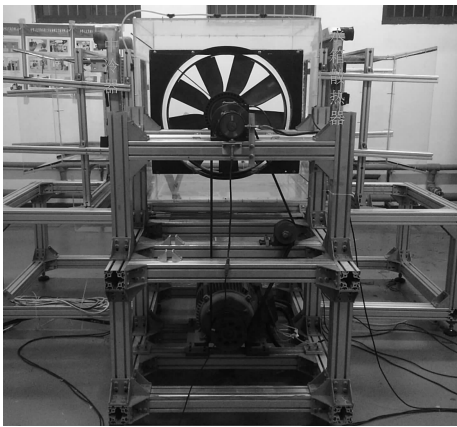


图 2 独立式散热舱模拟试验系统结构图

1.2 独立式散热舱流动特性试验方案

本研究主要内容为常用工况下独立式散热舱内散热器流动阻力变化规律,散热器表面风速分布不均匀性规律,以及散热器安装角度、安装位置等因素对流动阻力和气体流动不均匀性的影响规律。

为研究各常用工况下上述因素对独立式散热舱冷却空气侧流动性能的影响,笔者制定的试验方案如表 1 所示。

试验将结构类型 A 作为台架的基本结构,具体分布如图 2 所示,该试验研究独立式散热舱基本结构下散热器流动阻力特性和气体流动不均匀性。笔者在结构 A 的基础上,分别将中冷器和水箱散热器倾斜 10°、20°、30° 安装,研究散热器安装角度对散热舱流动性能的影响。笔者在结构 A 的基础上,本研究将中冷器和

水箱散热器由对置安装改为呈垂直关系安装,研究散热器安装位置对散热舱流动性能的影响。

表 1 试验方案

结构型式	台架结构	电机转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$			
A	中冷器和水箱散热器对置分布,未倾斜安装	1 200	1 400	1 600	1 800
	中冷器和水箱散热器对置分布,均倾斜 10° 安装	1 200	1 400	1 600	1 800
B	中冷器和水箱散热器对置分布,均倾斜 20° 安装	1 200	1 400	1 600	1 800
	中冷器和水箱散热器对置分布,均倾斜 30° 安装	1 200	1 400	1 600	1 800
C	中冷器和水箱散热器垂直分布,未倾斜安装	1 200	1 400	1 600	1 800
	中冷器和水箱散热器垂直分布,未倾斜安装	1 200	1 400	1 600	1 800

关于散热器倾斜安装的方式, Lisa Henriksson 等^[9]提出了如图 3 所示的两种方案。在方案 A 中,风道尺寸不变,散热器迎风面积改变;在方案 B 中,散热器迎风面积不变,风道尺寸改变。方案 B 改变风道横截面面积,影响了通过散热器的气体流量,对散热器安装角度的研究会产生一定干扰,结合工程应用中车辆散热器进风口横截面不会发生改变的实际情况,本研究在倾斜安装散热器时选择 A 方案提供的方式。

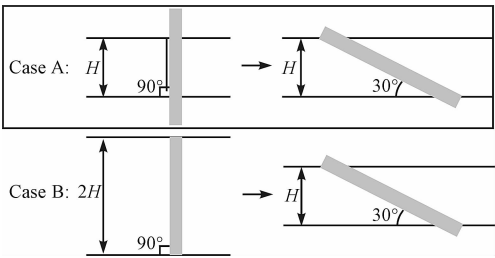


图 3 散热器倾斜安装方式

1.3 试验设备及方法

该试验在独立式散热舱模拟试验系统上进行,试验中测量的参数包括风扇及散热器前后端面压差,风扇转速及扭矩,各散热器入口速度分布。本试验使用的仪器主要有压差传感器、扭矩传感器、转速传感器、叶轮风速仪等,其具体要求如表 2 所示。试验所用的传感器都经过标定,在数据采集与分析系统中利用文献^[10]中相关理论进行了误差分析,误差分析表明系统的测试数据可靠。

表 2 传感器参数表

名称	测量对象	测量范围	精度	数量
扭矩传感器	风扇扭矩/ N	$0 \sim \pm 100$	± 0.05 级	1
转速传感器	风扇转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	$1 \sim 5\,000$	± 1 级	1
压差传感器	风扇及散热器前后端面压差/ Pa	$0 \sim 1\,000$	$\pm 0.5\%$	6
叶轮风速仪	散热器入口风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0 \sim 36$	$\pm 0.25\%$	16

本研究用叶轮风速仪测量各试验方案下散热器表面入口风速分布时,将风道内散热器表面划分为 16 个均匀的测量通道,16 个叶轮分别置于每个通道的中心处并紧贴散热器表面安装。笔者按照表 1 的试验方案改变热交换器安装位置和安装角度,调整变频电机转速,改变风道内气体流量,当系统各参数达到设定值并稳定后,通过计算机数据采集系统采集试验数据。

2 试验结果及分析

2.1 散热器流动阻力分析

冷却气流通过散热器芯部时,对散热器压力变化起影响作用的因素主要包括四个方面:①截面收缩段的入口效应;②翅片通道内的流动加速;③芯体内部表面的摩擦影响;④截面扩张段的出口效应。通常情况下,车用散热器的芯部通道普遍较短,翅片通道内空气加速效应对散热器阻力的影响非常小,可忽略。因此,通过散热器芯部的压力降计算公式可表示为:

$$\Delta p = \frac{\rho v_m^2}{2} \left(f \frac{A_a}{A_c} + K_c + K_e \right) \tag{1}$$

式中: v_m —散热器进出口风速的算术平均值; A_a —空气侧换热总面积; A_c —芯部自由流通面积; f —摩擦因子; K_c, K_e —进、出口压力损失系数。

由式(1)可知,散热器阻力与散热器表面入口风速呈正相关性,为研究本试验中不同安装倾角和安装位置下散热器阻力变化情况,此处引入当量风速 v_R ^[10]:

$$v_R = \sum_{k=1}^n v_k \frac{A_k}{A_R} \tag{2}$$

式中: n —散热器表面入口风速测量单元数, A_k —风速测量单元面积, A_R —散热器入口总面积, v_k —流经测量单元面积的风速。

当量风速 v_R 即为散热器表面入口平均风速,本研究通过计算分析该值的变化规律进而分析散热器阻力。

根据叶轮风速仪测得的散热器表面风速分布情况,由公式 $Q = \sum_{k=1}^n v_k A_k$ 分别计算出通过中冷器和水箱散热器的气体流量,结果如图 4 所示。随着安装

角度从0°变化到30°,通过水散的气体流量呈现出先略微上升后下降的规律,通过中冷器的气体流量则先略微下降后上升。

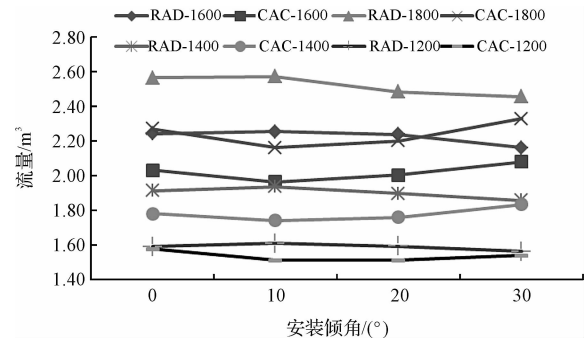


图4 不同安装倾角下中冷器和水散的流量变化规律

笔者由上述计算得出的散热器流量值,分别计算相应的散热器当量风速值,结合测得的散热器流动阻力,作出不同安装倾角下散热器阻力随当量风速 v_R 的变化关系图,如图5所示。由图5可知,在相同倾角下,散热器入口表面积不变,随着风扇转速增加,中冷器和水散的当量风速 v_R 增大,二者流动阻力也增大;在相同风扇转速下,随着安装倾角的增大,散热器入口表面积增大,中冷器和水散的当量风速 $v_R v_R$ 减小,二者的流动阻力也分别相应减小,因此在相同风扇转速下,安装倾角在30°以内时,倾角越大中冷器和水散的流动阻力越小;而在相同当量风速下,中冷器和水散未倾斜安装时的流动阻力最大,在安装倾角为20°时的流动阻力最小。

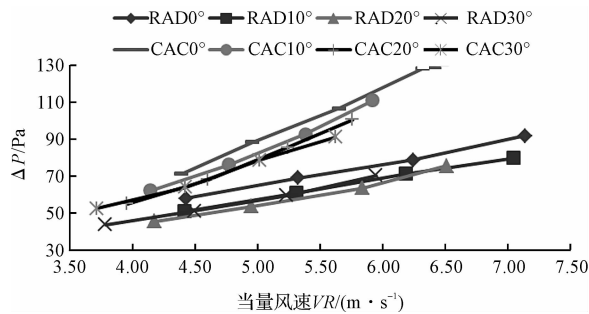


图5 中冷器和水散流动阻力随当量风速的变化规律

中冷器和水箱散热器的安装位置则由对置形式改为垂直形式时,散热器阻力变化规律如图6所示。相同风扇转速下,中冷器和水散垂直安装时的当量风速值均大于对置安装时的风速值,二者的流动阻力在垂直安装时也都大于对置安装时的流动阻力。出现这种现象主要是因为对置安装时,通过中冷器和水散的空气流动方向相反,二者对对方流动的阻碍作用更加显著,这使得流经中冷器和水散的风速相对较小,由公式(1)可知这种情况下散热器阻力也相应较小。

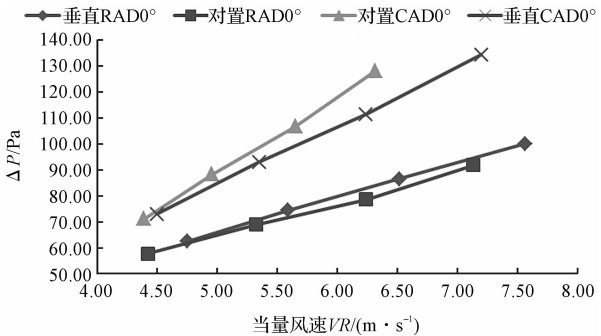


图6 散热器阻力随安装位置的变化规律

2.2 冷却空气流动不均匀性分析

换热介质的流动均匀性对散热器的流动阻力和散热性能都有着重要影响。笔者为研究空气流动不均匀性对独立式散热舱流动特性的影响,引入了速度场相对不均匀性系数 $i^{[10]}$:

$$i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{v_k - v_R}{v_R} \right| \tag{3}$$

根据叶轮风速仪测得的散热器表面速度分布,分别计算不同工况下散热器表面风速分布的相对不均匀系数 i ,结果如图7、图8所示。由图7可知,在同一安装倾角下,随着风扇转速的增加,中冷器和水散的相对不均匀系数基本不变。随着安装倾角的增加,中冷器和水散表面速度分布的相对不均匀系数均增加,且在同一风扇转速和安装倾角下,中冷器相对不均匀系数均大于水散相应的值。由图8知,在同一风扇转速下,中冷器和水箱散热器表面风速分布相对不均匀系数在垂直安装时比对置安装时大。

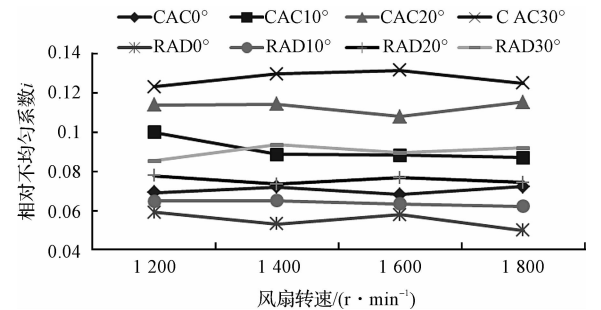


图7 不同安装倾角下散热器表面速度分布相对不均匀系数*i*

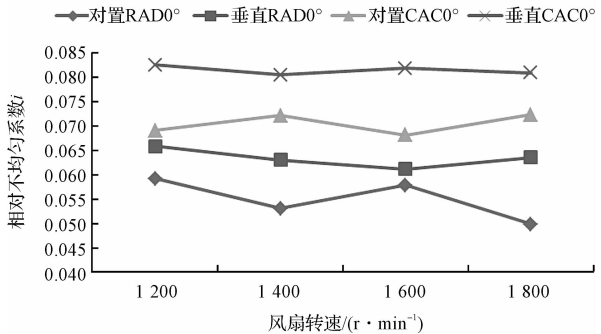


图8 不同安装位置下散热器表面速度分布相对不均匀系数*i*

在试验各工况中,随着散热器倾斜安装,中冷器和水箱散热器表面入口风速分布均出现了“分层”现象,即较大风速集中出现在散热器表面的上端和右侧,较小风速则集中出现在散热器表面的下端和左侧,并且随着安装倾角的增大,这种“分层”现象越明显。这主要是因为在该试验台架上,散热器右侧在安装位置上更靠近风扇,而随着散热器安装倾角的增加,中冷器和水散的上端与风扇的距离逐渐减小,下端与风扇的距离逐渐增大,安装距离的缩小减小了风扇与散热器之间的系统阻力。结合图 7、图 8 可知,这种“分层”现象导致了安装倾角越大,散热器表面速度分布越不均匀,相对不均匀系数越大,而由于中冷器芯部管尺寸更大,翅片分布更稀疏,中冷器比水箱散热器表面速度分布更不均匀。

2.3 风扇与散热舱匹配分析

该试验台架的空气流动由吸风式风扇驱动,通过风扇的气体流量等于通过中冷器和水箱散热器的冷却气体流量之和。结合试验测得的风扇压升以及相应工况下计算得出的总风量,作出风扇压升与气体流量之间的变化关系图,如图 9 所示。由图 9 可知,在各试验方案下,系统风扇压升都比较小,对应的总风量却比较大^[12]。

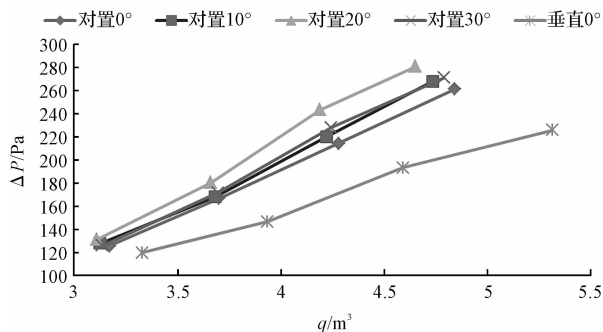


图 9 不同试验方案下风扇压升与总风量的变化关系

根据以上风扇压升和风量的变化关系曲线以及台架吸风式风扇的性能曲线,作出风扇与独立式散热舱的匹配曲线,如图 10 所示。该散热舱系统阻力较小,通过的气体总流量较大,这就使得本试验台架所用的吸风式风扇经常工作于风扇压升较小、气体流量较大的区域。根据试验测得的风扇扭矩、风扇压升、系统气体流量等,由公式 $\eta = HQ/p = 9550H \cdot Q/(T \cdot n)$ 计算

本试验台架风扇的效率,据结果可知大部分工况下风扇效率都处于 30% 以下,风扇效率偏低。因此,根据独立式散热舱系统阻力偏小、冷却气体总流量较大的特点,本研究应选择正常工作下风扇压升小、气体流量大的吸风式风扇与之相匹配。

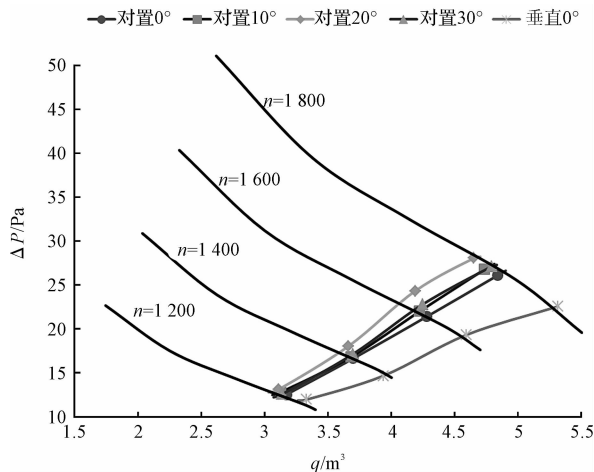


图 10 风扇与独立式散热舱匹配关系

3 结束语

本研究依靠新开发的独立式散热舱模拟试验系统,对独立式散热舱的散热器流动阻力、气体流动不均匀性、风扇与散热舱的匹配关系等进行了试验研究,通过对比分析可以得到以下结论:

(1) 散热器倾角在 30° 以内时,随着中冷器和水散的倾斜,二者的流动阻力逐渐减小,通过中冷器的气体流量先下降后上升,通过水散地气体流量先上升后下降。中冷器和水箱散热器的相对位置关系由对置改为垂直时,二者的流动阻力和气体流量均变大。因此,在独立式散热舱的实际工程应用中,如果安装空间等条件允许,可以通过适当调节散热器的安装角度和安装位置来改变通过散热器的气体流量。

(2) 散热器对置安装时,随着散热器倾斜,散热器表面速度分布出现“分层”现象,倾斜角度越大,“分层”现象越明显,散热器表面速度分布越不均匀。散热器由对置安装改为垂直安装时,散热器表面速度分布更加不均匀。

(下转第 356 页)

本文引用格式:

郭 震,刘震涛,傅佳宏. 独立式散热舱冷却空气侧流动特性试验研究[J]. 机电工程,2016,33(3):298-302,351.

GUO Zhen, LIU Zhen-tao, FU Jia-hong. Experimental study on air flow characteristics of detached cooling system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):298-302,351.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>