

减振与降噪

船用柴油机振动噪声性能标准分析

沈建平^{1,2}

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘要: 针对船用柴油机振动噪声指标越来越受到重视, 而这些指标的衡准仍然存在不规范、不系统甚至概念错误的现状, 对现有相关的国家和行业标准进行了系统梳理。基于性能评价需求及工程实践, 比较了不同指标、不同标准之间的差异和存在的问题, 指出并纠正了一些概念和常规理解的差错; 着重对相关的测试方法、限值和评价准则进行了深入研究, 明晰了各性能指标标准之间的逻辑关系和技术脉络, 提出了现有标准要改进和完善之处; 给出了这些标准在当前工程应用中的取舍建议, 为船用柴油机振动噪声标准体系的建设和进一步完善提供了依据。

关键词: 船用柴油机; 振动; 噪声; 标准

中图分类号: TK421+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)05-0039-11

Standard Analysis for Vibration and Noise Performances
of Marine Diesel EnginesShen Jianping^{1,2}(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;
2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: In view of the increasing attention paid to the vibration and noise requirements of marine diesel engines, and the fact that the quotas are still non-standard, non-systematic or even wrong conceptually, the relevant national and marine industry standards were systematically collated. The differences and contradictions between varied quotas and standards were compared based on the performance evaluation requirements and engineering practice, and some conceptual and conventional understanding errors were pointed out and corrected. The analysis focused on the relevant test methods, limit values and evaluation criteria, clarified the logical relationships and technical map of each performance quota. It is pointed out that the existing standards need to be improved and perfected, and suggestions for the choice of these standards in the current engineering application were put forward. The research provides the basis for the construction and further improvement of the marine diesel engine vibration and noise standard system.

Key words: marine diesel engine; vibration; noise; standard

0 引言

与车用发动机严格的 NVH 限制相比, 船用发动机的振动噪声指标似乎要宽松些。随着近年各船级社对船舶舒适度认证要求的提高, 以及某些特殊船舶(如科考船、调查船、极区航行船、军船)

对舱室环境、海洋生态环境、水下辐射噪声的严格控制, 船用柴油机的振动噪声限制也越来越受到重视。与此相关的标准也愈加引起科研和工程技术人员关注, 相关的标准体系及其科学性、合理性、先进性和可操作性也成为讨论的热点。

内燃机由于其固有的特性, 自其诞生之日起,

收稿日期: 2020-08-14

作者简介: 沈建平(1967—), 研究员, 主要研究方向为船舶动力系统振动噪声控制, sjp2016@outlook.com。

振动噪声问题即伴随着诸如功率的增加、效率的提升等给工业和人们日常生活带来便利的同时,困扰着设计、制造和法规制定等相关方。与车用发动机不同,船用发动机一般功率更高,体积更大,重量更重;由于使用环境的特殊性,还配置了更多的辅助系统,如燃油预处理、辅助冷却系统、滑油和冷却水预热系统等,使得对船用发动机的振动噪声指标的衡量和测试难度更大,相关标准的制定和统一也更困难。

在我国的标准体系中,针对某一产品的某项性能,如果涉及不同的行业和应用场合,往往既有国家标准也有行业标准,可能还有适应不同应用场合的行业标准。内燃机就是这样的典型。因此,讨论船用柴油机的振动噪声标准,势必要研究不同层级、不同行业、不同应用场合的各级各类标准。

技术角度,主要从三个方面来衡量柴油机的振动噪声性能:振动、噪声和扭振。振动性能一般从发动机本身振动平衡性和振动传递两个指标进行衡量,前者用振动烈度,后者用机脚振动响应;噪声性能采用柴油机辐射空气噪声衡量;扭振性能用柴油机系统扭振应力衡量。有了评价指标,还得规定相应的测试方法,因此,一项性能指标往往须要规定限值和测试方法的一对标准,或者说一个标准涉及两方面内容。

1 船用柴油机振动噪声性能标准

表 1 为船用柴油机现有的振动噪声性能标准,下面从振动、噪声及扭振三个方面对现有的标准进行梳理分析。

表 1 船用柴油机现有振动噪声性能标准一览表

性能类别	标准号	标准名称
振动	振动烈度	GB/T 7184—2008 中小功率柴油机振动测量及评级
		GB/T 6075.6—2002 在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动 第 6 部分:功率大于 100 kW 的往复式机器
		GB/T 28784.4—2017 机械振动 船舶振动测量 第 4 部分:船舶推进装置振动的测量和评价
		GB/T 16301—2008 船舶机舱辅机振动烈度的测量和评价
		CB/T 3256—2013 船用柴油机振动评级
		CB/T 3154—2011 船用柴油机振动测量方法
	振动响应	GB/T 20787—2006 往复式内燃机 中、高速往复式内燃机底脚结构噪声测试规范
噪声	GB 11871—2009	船用柴油机辐射的空气噪声限值
	GB/T 14097—2018	往复式内燃机 噪声限值
	GB/T 9911—2018	船用柴油机辐射的空气噪声测量方法
	GB/T 1859.1—2015	往复式内燃机 声压法声功率级的测定 第 1 部分:工程法
	GB/T 21425—2008	低噪声内燃机电站噪声指标要求及测量方法
扭振	GB/T 15371—2008	曲轴轴系扭转振动的测量和评定方法
	GB/T 6072.5—2003	往复式内燃机 性能 第 5 部分:扭转振动
	CB/T 3853—2011	船用柴油机轴系振动测量方法
	CB/T 3325—2013	船用柴油机轴系扭转振动评级

1.1 振动性能标准

如何对机械设备或机器的振动状况进行评价一直是学术研究的热点之一,至今仍然没有明确的结论,因而成为工程操作的难题。主要原因是振动的影响因素太复杂,既有机理方面的,也有结构方面的,还有环境方面的。对柴油机振动性能的评价,理论上似乎很容易说清楚,但实际操作要么不现实,要么理想的边界条件无法达到。对于工程实践来说,却又非常希望通过确定性的评价准则,来衡量产品的性能优劣、质量高低。

从振动原理角度,衡量柴油机本身的振动状况应该包括两个方面:柴油机本身振动的强度及其振动对环境或与其相关的设备的影响。一般前者采用

振动烈度,后者采用柴油机机脚振动响应来衡量。振动烈度从总体上考察机器本身的振动情况,可以作为柴油机上安装的主要附件如增压器、冷却器、泵等能否正常工作的衡准,但还不能作为柴油机本身零部件损坏的衡量指标,正如 GB/T 7184—2008 中小功率柴油机振动测量及评级^[1]标准引言中所述的那样。机脚振动响应可以是振动位移、速度和加速度,是一种能量的概念,结合机器质量,基本可以衡量从安装机脚传递给环境的振动影响。

1.1.1 振动烈度

船用柴油机振动烈度相关的国家标准共有 4 项,行业标准有 2 项,分别为(最新版):

(1) GB/T 6075.6—2002 在非旋转部件上测量

和评价机器的机械振动 第 6 部分：功率大于 100 kW 的往复式机器^[2]；

(2) GB/T 7184—2008 中小功率柴油机振动测量及评级；

(3) GB/T 28784.4—2017 机械振动 船舶振动测量 第 4 部分：船舶推进装置振动的测量和评价^[3]；

(4) GB/T 16301—2008 船舶机舱辅机振动烈度的测量和评价^[4]；

(5) CB/T 3256—2013 船用柴油机振动评级^[5]；

(6) CB/T 3154—2011 船用柴油机振动测量方法^[6]。

GB/T 6075.6—2002 等同采用国际标准 ISO10816—6:1995，明确规定适用于船用推进发动机、船用辅机、柴油发电机组，既给出了测量方法，也给出了评价准则，二者均可用于柴油机的运行监测和验收试验，但该标准只限于功率 100 kW 以上的发动机。

GB/T 7184—2008 代替了 GB/T 7184—1987 中小功率柴油机振动测量方法和 GB/T 10397—2003 中小功率柴油机振动评级两个标准，即把原来对中小功率柴油机的振动测量方法和评级准则合并成为一个标准，适用于船用主机、船用辅机及发电机组。该标准定位于中小功率，但并没有明确具体的功率范围；明确了适用于船用柴油机，而对于大功率船用柴油机显然不适用，但具体多大功率又不明确，实际操作上存在困难。

仔细分析上面两个标准，内容几乎相同，二级标题也是一样的。但有两处主要的不同点：关于测量方法，在“测点位置和测点方向”中的发动机型式，GB/T 7184 多了一型卧式单缸机的示例；关于评价方法，在振动烈度等级表中，GB/T 7184 的范围是 0.3 ~ 180，多了 0.3、0.5、0.7 三级，这两点都是中小功率柴油机的特点。除此之外，这两个国家标准均规定了测量方法（测量仪器及参数、测点位置和测量方向、测量工况和结果记录）、振动评价准则，两个标准都规定须测量所要求的位置测点的三个方向的 2 ~ 10 Hz 的位移、10 ~ 250 Hz 的速度、250 ~ 1 000 Hz 的加速度；按振动烈度级表格确定每个点三个方向中不同参数的测量值对应的振动烈度级，最大值即为该点的振动烈度级；所有测点中的最大振动烈度级即为该柴油机的振动烈度级，然后按照附表 A1 中的机器振动分类和测得的振动烈度级，确定

机器处于三个评定范围 A/B、C、D 中的一个，从而确定柴油机的振动状况。一般新交付的机器处于 A 区，处于 B 区的可以长期运行；处于 C 区的不宜作长时间连续运行，应进行适当维修；处于 D 区的振动足以导致机器损坏。

关于评价准则，两个标准都给出了如表 2 的附表 A1 作为振动分级的标准值。两个标准几乎一样，只不过如前所述 GB/T 7184 多了低振动烈度的三级。由表可以看出，如果要确定某型柴油机的分级，除了根据测得数据判断得出的该机器的最大振动烈度级，还要确定机器的分类，即确定该型柴油机属于振动分类 1 ~ 7 中的哪一类。GB/T 7184 给出了附录 D 作为参考，用于确定机器的分类，而 GB/T 6075.6 给出了附录 D，但附录 D 是空的，原 ISO 标准也是空的，只是建议根据机器型号、用途、尺寸、形状、弹性或刚性支撑及转速进行分类，且推荐船用柴油机划入 5、6、7 类，并没有具体给出如何划入哪一类，因此实际使用该标准时，准则选取有一定弹性。

GB/T 28784.4—2017 机械振动 船舶振动测量 第 4 部分：船舶推进装置振动的测量和评价中也有对船用柴油机振动测量和评价的规定。该标准是等同采用国际标准 ISO 20283—4:2012 转化的，是船舶振动测量系列标准中对于推进装置振动的测量和评价，也即对船用主机振动的测量和评价，适用于海船和内河船舶柴油机装船后的试航试验。该标准中涉及的柴油机明确为两冲程柴油机和四冲程中高速柴油机。两冲程柴油机一般均为直接传动，转速范围为 70 ~ 250 r/min，刚性安装在船体基座上；四冲程柴油机的转速范围为 300 ~ 2 500 r/min，低转速适合于大型中速机，高转速适合于紧凑的高速柴油机，一般通过齿轮箱连接至螺旋桨轴，且大多采用弹性安装。标准中规定的测点位置和布置、测量方法与 GB/T 6075.6 基本一致，更明确了柴油机振动最大值通常在第 3 层（顶层），但对于大多数两冲程柴油机，以及刚性安装的四冲程速柴油机，可接受的振动等级在第 1 层时，应考虑船体的要求。关于评定准则，明确由发动机厂家给出；如果厂家没有给出的，推荐采用 GB/T 6075.6—2002 中的表 A1 及其相关说明；由于柴油机是定型产品，标准强调了充分考虑船级社和国际规范的重要性，以及船东要求。关于测量量标，对于两冲程低速机，为了确定振动幅值的均方根值，频率范围限制在 1 ~ 100 Hz，这与 GB/T 6075.6 不同。

表 2 往复式机器振动分类及标准值

振动烈度级	机器结构上测得的总振级最大值			机器振动分类							备注
	位移（rms）／ μm	速度（rms）／ （mm·s ⁻¹ ）	加速度（rms）／ （m·s ⁻² ）	1	2	3	4	5	6	7	
				评定范围							
0.3	4.5	0.28	0.44	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	GB/T 7184 增加三个等级。
0.5	7.1	0.45	0.70								
0.7	11.3	0.71	1.11								
1.1	17.8	1.12	1.76								
1.8	28.3	1.78	2.79								
2.8	44.8	2.82	4.42								
4.5	71.0	4.46	7.01	C	C	C	C	C	C	C	两个标准 共用的等级。
7.1	113.0	7.07	11.10								
11.0	178.0	11.20	17.60	D	D	D	D	D	D	D	
18.0	283.0	17.80	27.90								
28.0	448.0	28.20	44.20								
45.0	710.0	44.60	70.10								
71.0	1 125.0	70.70	111.00								
112.0	1 784.0	112.00	176.00								
180.0	>1 784.0	>112.00	>176.00								

柴油机除了用作船用推进主机外，另一个广泛的应用场合是船用辅机，包括柴电机组。与之相关的振动测量和评价方法参考标准 GB/T 16301—2008 船舶机舱辅机振动烈度的测量和评价。该标准采用振动速度的均方根值作为表征机器振动烈度的量标，即测量柴电机组不同指定测点位置三个方向的振动速度均方根值；采用式（1）计算机器的振动烈度，测量的频率范围为 10 ~ 1 000 Hz。

$$V_s = \sqrt{(\frac{\sum V_x}{N_x})^2 + (\frac{\sum V_y}{N_y})^2 + (\frac{\sum V_z}{N_z})^2} \tag{1}$$

式中： V_s 为振动烈度，mm/s； V_x 、 V_y 、 V_z 分别为某测点测得的三个方向的振动速度的均方根值，mm/s； N_x 、 N_y 、 N_z 分别为 X、Y、Z 三个方向的测点数。

同样，该标准明确了与测量有关的测试系统、测点布置和方向、安装和测量条件、测量报告等要求。关于评价准则，标准把柴电机组分为功率小于等于 75 kW 的第四类和大于 75 kW 的第五类，把振动烈度的评价也分为 A（优良）、B（良好）、C（合格）、D（不合格）四级工作状态，并按弹性支承安装和刚性支承安装两种安装状态列出判别表，根据测量数据计算得到振动烈度，结合柴电机组分类和安装支承方式，在相应的判别表中可以查到柴电机组所处的工作状态，从而判别机组的安全可靠程度。

严格来说，该标准针对的是柴电机组，测量中

测点的布置涉及发电机，而不仅仅是柴油机的振动，因此，与仅考察柴油机振动的前述的标准，在评价准则的振动烈度级上不具有可比性。

关于量标，该标准与前面几个标准虽然都采用振动烈度进行考核，但振动烈度的定义有所区别。这是由于 GB/T 2298—2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇^[7]新版本对振动烈度术语的注进行了修改的原因。新旧两个版本对振动烈度术语的定义基本相同：“诸如最大值、平均值、均方根值或其他描述振动参数的一个或一组数值，涉及多个瞬态值或多个平均值。”基本定义很严谨，学术性很强，因此下面用注的形式进行了补充。老版本的 GB/T 2298—91 机械振动与冲击术语中有一个“注：机器的振动烈度被定义为在机器的轴承和机座等特定点特定方向的振动速度的最大均方根值”，因此，在新版出来前，振动烈度一般都采用振动速度作为量标；而新版的注有 3 个，其中：“注 1：振动烈度是一种通称，过去在涉及振动速度时经常使用，然而现在更多地用于位移、加速度等其他测量量”，“注 2：机器的振动烈度定义为在机器的多个不同点如轴、轴承或机器结构的其他部件上所测得的振动量的最大值”。老版本之所以这么注，主要是便于实际操作，但在概念上是不全面的，也就是对于振动烈度只用振动速度来表征了。至于该标准采用振动速度的均方根，其实与老版本的原始定义也是不相符的；而新版本符合振动烈度的原始定

义,至于可操作性,只要在标准中明确了测点位置、测点方向和测量的频率范围,新版本的振动烈度也是可以操作的。此外,新版词汇的振动烈度只是一个分量,而该标准的振动烈度是一个三向合成量,所以在确定振动烈度级时是有所区别的。

船用柴油机振动测量和评定还有两个行业标准:CB/T 3154—2011 船用柴油机振动测量方法和CB/T 3256—2013 船用柴油机振动评级。从字面上看,这两个标准是测量方法与评价准则的配合,类似于姐妹标准,但实际上不是这样的。CB/T 3154明确:适用于钢质船舶的主、辅柴油机的实船试验和台架试验;以及试验的量标、频率范围、测点位置和方向。对测试系统的要求等与GB/T 6075.6—2002 几乎一致;而对于船舶主机的测量要求,与GB/T 28787.4—2017 基本一样。不同的是,在测量记录表中,该标准的位移单位是mm,加速度单位是 mm/s^2 ,而两个国标的单位分别是 μm 和 m/s^2 ,这是须要注意的。

至于CB/T 3256—2013,明确适用于船用中高速柴油机的试车台架试验;虽然是评级标准,但又规定了测量系统、测点布置和方向、测量条件和测量工况等,在内容上已经包括了CB/T 3154—2011;整个标准与GB/T 6075.6—2002、GB/T 7184—2008类似,相当于对该两标准在船用柴油机应用场合做裁剪。该标准把船用柴油机分为刚性安装和弹性安装两类,也采用了A、B、C、D的评定区域法,但对于每个区域的最大振动烈度级限制要比GB/T 7184严格些。如该标准对刚性安装柴油机的最大振动烈度级限制是11,而按GB/T 7184查得的最大值是28,相差两个等级。当然,按照GB/T 7184的附录D,刚性和弹性安装的船用柴油机均为5类,也就是说限值是一样的,弹性安装的也是28,这与CB/T 3256要求的倒是—致了,但显然是不合理的。所以,从评价准则来说,CB/T 3256确定的评价表格似乎更合理些,也更具操作性。因此,涉及船用柴油机振动测量和评级的标准,CB/T 3256—2013 船用柴油机振动评级虽然标题有点不合适,但相对更为合理,也更受工程师欢迎。

以上标准中所述的柴油机振动均指柴油机的振动烈度,这也是行业惯例。

1.1.2 机脚(底脚)振动响应

柴油机作为一个激励源,除了向外辐射空气噪声,还通过支承结构、管路和轴,激励或引起与其连接的设备和环境,形成结构振动,进而又激励机

构的表面,导致产生二次声波或结构噪声辐射。因此,评估柴油机通过支承的振动大小也是一项重要工作。

虽然该工作看起来十分重要,但遗憾的是,目前与此有关的标准只有一项,就是GB/T 20787—2006 往复式内燃机 中高速往复式内燃机底脚结构噪声测试规范^[8],还没有相关的评级准则;而且就该标准的内容来看,也存在众多可商榷之处,可操作性不强,有些还须在科研上进行深入探讨。

该标准等同采用ISO13332:2000,适用于陆用、轨道牵引和船用中高速往复式内燃机,不适用于低速机;试验可在试验台或现场进行,但均须与用户和厂商协商;本方法是工程法,不是精确法。

GB/T 20787测试的基本原理是:将被测发动机安装在适宜的支承上,备以必要的供应(空气、燃油、排气、冷却、润滑、电源),并配上负载系统以吸收发出的功率。这些供应装置应通过柔性连接,不致对发动机的振动产生明显的影响。其中最主要的就是适宜的支承,一般采用弹性元件安装在巨大的刚性底座上,弹性元件的固有频率 f_0 应尽可能低。

如何确定固有频率 f_0 是关键,一般人耳可以听到的最低频率是20 Hz,所以 f_0 取7 Hz;此外,四冲程发动机的最低激励频率是二冲程发动机的一半,因此,根据人耳特性和发动机着火循环特性确定 f_0 。该标准给出了图1作为确定 f_0 的参考,图中1、2区域分别对应二、四冲程发动机。

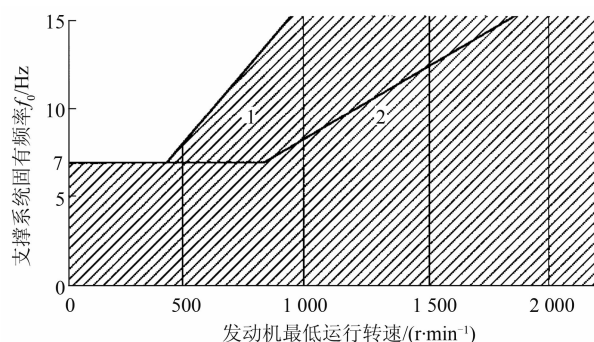


图1 支承系统固有频率与发动机最低转速的关系

确定了 f_0 后,须要确定振动量测量的频率范围,即可靠测量的下限频率 f_1 和上限频率 f_2 。下限频率由支承系统的特性决定,一般取 $3f_0$,这样可以确保测量值不致因支承系统在固有频率上发生共振而引起动态放大。为了使可靠测量的上限频率尽可能高,发动机上安装的底脚的刚性应尽可能大,也即上限频率受限于安装底脚与弹性元件相接触部分产生的一阶模态振动频率,否则,此处安装的红

速度计不能可靠描述底脚的平均运动。由此可见, f_2 的确定须要借助对发动机底脚的实际测量或计算。

该标准推荐的实际测量步骤为: 针对每一个发动机底脚, 在每一个测量方向上, 进行以下工作。

- (1) 确定 f_0 ;
- (2) 求出 f_1 ;
- (3) 确定该底脚在该测量方向上的 f_2 ;
- (4) 测量记录发动机在被测工况下所有底脚在三个测试方向上的全部振动速度值;
- (5) 分析测量的倍频程或 1/3 倍频程频谱;
- (6) 将每个底脚的不同方向频谱叠加在一个图上;
- (7) 将所有底脚同一方向的频谱叠加在一个图上 (共三个方向);
- (8) 计算三个方向上所有底脚的平均速度级。

该标准推荐采用振动速度均方根值作为评价量标, 这是比较科学的, 因为一般结构噪声与速度对应, 而工程中常用加速度并不合适。比如船舶辐射水下噪声, 就是与振动速度对应的, 但标准在附件的记录报告中, 也推荐了加速度均方根值作为评定参数。此外, 计算速度级的基准速度一定要明确, 一般有 10^{-9} m/s 和 $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 两种, 前者是 ISO 标准推荐的, 而后者往往在结构噪声中普遍采用, 二者相差 34 dB。

标准的其他内容主要规定了测试原理、支承选择、测点位置等, 尤其是对底脚上传感器的安装位置和方式规定得比较详细。标准没有对评价方法和评定准则作出规定, 而实际工程中, 对于评价准则的争论一直居高不下。有规定总振级的, 也有规定分频段振级的, 还有规定特征线谱的。至于振级数值多少合适, 更是没有统一的标准, 一般大多数柴油机厂家根据自身的产测量数据, 预留适当的余量后, 提出一个值。至今还没有从柴油机振动本身的角度和需求提出限制值, 须进一步开展这方面工作。

目前工程实际中柴油机机脚振动的测量与该标准的要求还是有一定距离的。首先, 大多数柴油机并不采用弹性安装, 支承系统的固有频率选择更是无从谈起。测得的刚性安装状态下的机脚振动响应与安装基座的刚性关系很大, 不能反映柴油机本身的振动状况; 测量的频率范围是根据需要设定的, 没有考虑安装系统和底脚的基本特性; 一般测试量标大多采用加速度, 因而高频段十分突出, 而实际上高频段并不是结构噪声考察的重点; 对测点安装

位置的选择和传感器的安装也比较随意, 没有充分考虑底脚的模态等特性。

1.2 噪声性能标准

与振动性能测试和安装状态相类似, 柴油机噪声测量也与背景噪声、环境声学特性相关, 但对于噪声限值的规定则比较明确, 这与振动性能稍有区别。船用柴油机的噪声限值标准主要有两项:

- (1) GB 11871—2009 船用柴油机辐射的空气噪声限值^[9];
- (2) GB/T 14097—2018 往复式内燃机 噪声限值^[10]。

二者都以经验公式的方式, 给出了柴油机在某一工况 (转速、功率) 下的 A 计权声功率级限制值。虽然两个标准适用的范围相差很大, 但针对船用柴油机, 二者要求的工况几乎是一样的。GB/T 14097—2018 覆盖的内燃机范围从应用领域的角度看是非常广泛的, 几乎包括所有类型的发动机。实际上该标准是代替原来的 GB/T 14097—1999 中小功率柴油机噪声限值和 GB/T 15739—1995 小型汽油机噪声限值。GB/T 14097—1999 从功率范围来说只适用于缸径小于 160 mm 的柴油机, GB/T 15739—1999 只适合于功率小于 30 kW 的汽油机。原来的两个标准都以表格的形式给出噪声限值数据, 而最新的 GB/T 14097—2018 的限值数据以公式给出, 二者之间应该具有可比性; 但对于船用大功率、尤其是低速大功率船用柴油机, 其适用性须要更多数据验证。

标准 GB 11871—2009 考核标定工况, 且按标定功率 736 kW 为界, 大于该功率的, 又按转速 300 r/min 分别对待。具体的限值公式为:

$$L_w = 101 \log(n_r P_r) + C \quad (2)$$

式中: L_w 为标定工况下辐射噪声 A 声功率级, dB (A); n_r 为标定转速, r/min; P_r 为标定功率, kW; C 为常数, dB (A), 其值按表 3 选取。

表 3 常数 C 取值

条件		C/dB (A)
$P_r < 736 \text{ kW}$		62.0
$P_r \geq 736 \text{ kW}$	$n_r \leq 300 \text{ r/min}$	64.1
	$n_r > 300 \text{ r/min}$	63.0

GB/T 14097—2018 给出的噪声限值公式比较复杂, 但对于船用多缸柴油机, 考核额定工况, 该公式可以简化为:

$$L_w = 7.5 \log(n_r P_r) + 67.5 + 3(N - 1) \quad (3)$$

式中: N 为噪声等级序数, 即该标准对发动机噪声

进行等级划分，共分为四级，1 级， $N = 1$ ；2 级， $N = 2$ ；3 级， $N = 3$ ；4 级， $N = 4$ 。对于船用柴油机，目前还没有噪声分等级的概念，一般取 4 级。

为了比较两个标准对船用柴油机噪声限值的差异，分别计算了典型柴油机的限值数据，并与实测

数据进行了比较，见表 4。由表可见：GB 11871 的限值与实测值基本相符，而 GB/T 14097 因为有等级差别，取 4 级较接近实测值。此外，GB 11871 只考核柴油机某一工况的噪声，而 GB/T 14097 考核全转速范围，是一根曲线，二者有差别。

表 4 两个标准的船用柴油机噪声限值对比

柴油机分类		功率/kW	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	GB 11871 限值/dB (A)	GB/T 14097 限值(4 级)/dB(A)	噪声实 测值/dB (A)
低速机	MAN B&W 6S50ME	8 000	108	123.5	118.0	123.3
	MAN B&W 5S60ME	8 833	105	123.8	121.3	125.8
中速机	/	6 400	1 050	131.3	127.7	131.2
	16PC2—6B	12 000	520	131.0	127.5	139.3
	16PA6STC	5 184	1 054	130.4	127.0	129.4
	20PA6MTC	6 480	1 000	131.1	127.6	131.4
高速机	MTU 16V396	2 000	1 900	128.8	125.8	123.9
	MTU 20V956	3 700	1 455	130.3	127.0	127.6
	MTU 16V396 (机组)	1 000	1 800	125.6	123.4	121.7

两个标准均推荐了相应的测试方法，分别为 GB/T 9911—2018 船用柴油机辐射的空气噪声测量方法^[11]和 GB/T 1859.1~4 系列标准往复内燃机声压法声功率级的测定第 1 部分：工程法^[12]；第 2 部分：简易法^[13]；第 3 部分：半消声室精密法；第 4 部分：使用标准声源简易法。GB/T 9911 也推荐了两个方法：工程法和简易法。

须要明确的是，柴油机是作为一个声源，须限制其噪声值，因此衡量的参数必定是声功率，而不是声压，这在当前实际工程中往往是比较容易混淆的。声功率和声压是两个完全不同的概念。两个测试方法标准都采用测试声压级换算成声功率级的方法，测量声压级可以是 A 计权的，也可以是倍频程或 1/3 倍频程的，换算的公式为：

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \log(S/S_0) \quad (4)$$

式中： $\bar{L}_p$ 为经背景噪声和环境修正后，测量表面测得的平均声压级，dB； S 为测量表面面积， m^2 ； S_0 为基准面积， $S_0 = 1 m^2$ 。

两个标准都明确：直接测量量为测量表面上的声压，GB/T 9911 明确可以是 A 计权的，也可以是倍频程或 1/3 倍频程频带的；GB/T 1859 没有明确，但给出了倍频程和 1/3 倍频程频带计算的说明。两个标准都分别给出了相关的背景噪声修正和声学环境修正方法，内容基本相同。

关于测点布置，GB/T 9911 直接给出了不同尺寸大小柴油机测量体的确定方法、传声器的数量和布置位置，见表 5。GB/T 1859 给出的方法比较间接，首先根据基准体尺寸与测量距离的相对大小，

将发动机分为小型、小型立式、长型、中型和大型等 5 类，每一型发动机分为若干个单元测量体，传声器布置在每个单元测量体的中心和角上，传声器数量见表 6。虽然 GB/T 1859 对于测点布置要求比较繁琐，但针对常见的船用中高速柴油机，用该方法确定为长型，测点数为 19，与 GB/T 9911 确定的测点数目一样。

表 5 GB/T 9911 标准规定的测点数量

基准体尺寸			测点数目
长 l_1/m	宽 l_2/m	高 l_3/m	
≤ 2	≤ 2	≤ 2.5	9
2 ~ 4	≤ 15	≤ 2.5	12
4 ~ 15	≤ 15	≤ 2.5	15
4 ~ 15	≤ 15	> 2.5	19
> 15	不限	不限	34

表 6 GB/T 1859 标准规定的测点数量

发动机类型	单元测量体数	测点数目
小型	1	9
小型立式	2	17
长型	3	19
中型	8	37
大型	12	48

有一点须特别注意：公式 (4) 理论上只对于均匀声场成立，因此，GB/T 1859.1 须要计算表面声压级平均值的标准偏差，如果该值 $\leq \sqrt{2}/2$ dB，则测试有效，否则测量无效，应另选一个测量面重新测量或选择更好的测量环境。该标准还要求传声器等面积布置，这些要求在实际测量中很难满足。

GB/T 9911 允许不等面积布置测点,但在计算平均声压级时,采用面积加权的方法;也并不要求各传感器测得值的均匀性,这是满足工程法测量精度的。由此看出,GB/T 9911 的可操作性更强。

关于测量和分析的频率范围,两个标准都没有明确。GB/T 9911 给出了声功率级测量不确定度的 1/3 倍频程中心频率范围为 100 Hz ~ 10 kHz; GB/T 1859 在术语中给出了测试频率范围为倍频程 63 Hz ~ 8 kHz 的中心频率范围 (50 Hz ~ 10 kHz 的 1/3 倍频程)。而实际工程测量中,A 计权噪声测量的频率范围一般取 20 Hz ~ 20 kHz。

其它方面,两个标准都对测量系统、测量不确定度、测量声学环境、工况和运行条件、背景噪声和环境修正方法、测试报告等进行了明确。裁剪到船用柴油机,二者几乎一样,只是 GB/T 1859 因为适用范围更加宽泛些,因而有些规定不那么直接,更加通用一些。

另一个与柴油机噪声相关的国家标准是关于柴油机电站的,也适用于船用柴油发电机组,即 GB/T 21425—2008 低噪声内燃机电站噪声指标要求及测量方法^[14]。该标准适用于由往复式内燃机驱动的工频 (50 Hz/60 Hz)、中频 (400 Hz)、双频 (50 Hz/400 Hz)、直流、交流陆用和船用电站,也即适用于船用柴油机组成的发电机组。标准规定了低噪声内燃机电站的噪声指标、原则性的降噪措施和测量噪声的方法,是参考了 GB/T 2820.10—2002 往复式内燃机驱动的交流发电机组第 10 部分:噪声的测量 (包络法)、GB/T 3768—1996 声学 声压法测定噪声源声功率级反射面上方采用包络测量表面的简易法,并结合了 GB/T 2819—1995 移动电站通用技术条件、GJB 235A—1997 军用移动电站通用技术规范、MIL-P-53132、ГОСТ21670 的技术内容编写的。

该标准中关于噪声的测量方法,按 GB/T 2820.10—2002 执行,基本上与 GB/T 9911 类似,包括测点选取、测试系统要求、背景噪声和环境修正等,但明确规定在测量面上测量 A 计权的声压级,然后计算平均声压级,而不计算声功率级。虽然也推荐了倍频程或 1/3 倍频程的测量方法,但没有给出指标值。标准规定了低噪声电站的噪声要求,如表 7 所示。根据测得的声压级,按表中要求的声压级限值,评定是否满足对应的建议使用场合的要求。该标准应该与 GB/T 16301—2008 船舶机舱辅机振动烈度的测量和评价中,关于柴油机组的振动测量与评价相对应,可以配套使用。

表 7 低噪声电站噪声指标要求值

序号	声压级/ dB (A)	建议使用场合
1	83	不要求经常进行人与人之间的直接对话,但可能偶尔须要在 0.6 m 处进行喊叫式对话。
2	78	偶尔须要使用电话或无线电进行通话,或偶尔须要在最远相距 1.5 m 处进行对话。
3	73	经常须要使用电话或无线电进行通话,或经常须要在最远相距 1.5 m 处进行对话。
4	68	偶尔须要使用电话或无线电进行通话,或偶尔须要在最远相距 1.5 m 处进行对话,且人员的工作时间可能长于 8 h。
5	65	

1.3 扭振性能标准

鉴于船用柴油机高度强化和严酷的工作工况,须对轴系扭转振动进行评价,与此有关的标准有:

- (1) GB/T 15371—2008 曲轴轴系扭转振动的测量和评定方法^[15];
- (2) GB/T 6072.5—2003 往复式内燃机 性能第 5 部分:扭转振动^[16];
- (3) CB/T 3853—2011 船用柴油机轴系振动测量方法^[17];
- (4) CB/T 3325—2013 船用柴油机轴系扭转振动评级^[18]。

首先须要明确扭转振动是针对系统的,如果仅针对柴油机而不构成系统,是不存在扭转振动的。因此 GB/T 15371 针对往复式活塞连杆机构组成的机组的旋转轴系; GB/T 6072.5 针对内燃机驱动的机组;两项行业标准则明确针对额定功率不小于 110 kW 的船用主柴油机推进系统、船用发电柴油机系统、重要用途的辅柴油机和恒速运转的推进柴油机系统。也就是说,扭振是跟柴油机驱动的负载轴系联系在一起的。

四个标准中,GB/T 15371 既规定了测试方法,也规定了评价准则; GB/T 6072.5 只规定了测量方法;而两个行业标准则分别规定了测试方法和评价准则,是配套使用的。至于标准适用范围,GB/T 15371 和 CB/T 3853 均明确规定适用于“每列气缸为三缸及三缸以上”柴油机系统; CB/T 3325 则明确适用于“额定功率不小于 110 kW 的”船用柴油机系统, GB/T 6072.5 明确适用于船用往复式内燃机驱动的机组。也就是说,行标的测试方法和评价准则标准的适用范围严格意义上是不一致的。

GB/T 15371—2008 主要规定了三方面的内容:

- (1) 轴系扭转振动的计算。主要计算自由振动和强迫振动,得到轴系固有频率和振型、轴系的激励响应。

(2) 扭振测量方法。规定了测量的仪器、参数、位置、工况和报告的要求。测量参数是扭转振动的振幅。

(3) 评价方法。标准规定了以扭振应力和振幅、振动扭矩为评定参数。评定时, 基于轴系固有频率的实测值和计算值误差在 $\pm 5\%$ 以内, 则可用实测点按自由振动计算的相应振型推算轴系其它位置的振幅、应力和扭矩, 这是理论基础。其中, 扭矩和应力分别按式 (5) 和 (6) 计算。以计算得到的值与相应的许用值比较, 评定轴系工作的可靠性。

$$M_{i,i+1} = A_1(a_i - a_{i+1})K_{i,i+1} \quad (5)$$

$$\tau_{i,i+1} = \frac{M_{i,i+1}}{W_{i,i+1}} \quad (6)$$

式中: A_1 为测量点最大分谐波振幅, rad; a_i 为相应振型第 i 质量的相对振幅; $K_{i,i+1}$ 为第 i 、 $i+1$ 质量间轴段的扭转刚度, $(\text{N} \cdot \text{m})/\text{rad}$; $W_{i,i+1}$ 为第 i 、 $i+1$ 质量间轴段的抗扭截面模量, mm^3 。

该标准规定: 许用应力分为持续运转、瞬时运转和超速运转三种情况, 对于不同的轴系选用不同的共振转速比和运转许用应力值, 且该值由供应商选定, 经用户确认, 而没有给出通用认可的建议参考值。此外, 标准还规定了扭振转速禁区, 范围如下:

$$\frac{16n_c}{18 - \gamma} \sim \frac{(18 - \gamma)n_c}{16} \quad (7)$$

其中: n_c 为共振转速, r/min ; γ 为 n_c 与额定转速之比。

GB/T 6072.5 等同采用了 ISO3046—5 : 2001, 规定了扭振的计算和测量方法, 其内容与 GB/T 15371 对应内容的第 4、5 节几乎一样。

与上述国标区别较大的是, 两个行标涉及完整的轴系振动指标, 即包括扭转振动、回旋振动和纵向振动, 因此, 在测试方法 CB/T 3853 中明确: 测试量标在针对扭振时为 rad, 针对应力时为 N/mm^2 , 针对回旋振动和纵向振动时为 mm。

由于涉及的轴系振动内容不同, 测试方法标准 CB/T 3853 与 GB/T 15371 中的相应内容“5 扭转振动的测量”以及 GB/T 6072.5 均有较大的差别。两个国标可能是因为适用范围较广, 因此内容比较笼统, 更多的是指导性质, 可操作性不强, 作为测试方法标准不太合适; 而行标则比较具体, 针对性强。

CB/T 3853 主要涉及测量系统、测点布置、测量条件、测量工况、测量要求、以及后续分析处理(频谱分析、阶次跟踪分析、数据整理及结果表达)等方面的要求。在测量系统中明确了对测量仪器、传感器、连接导线、指示装置和记录仪器的要求, 明确测量的频率范围为 $1 \sim 1\,000 \text{ Hz}$, 明确了扭振、纵振和回振测量采用的仪器等。在测量工况和测量要求中, 还明确了船舶航行试验和台架试验的具体要求, 也即本标准的使用场合不仅仅是台架试验, 而 GB/T 15371 和 GB/T 6072.5 则没有涉及航行试验。

对于升降速的非稳态测量, GB/T 15371 只是在“5.5 测量工况”中叙述了一句“必要时, 可在升速和降速转速连续变化下进行扭振测量”, 没有进一步明确其他细节; GB/T 6072.5 没有非稳态测量的内容; 而 CB/T 3853 则在测量工况、测量要求及后续分析处理等处均明确了对于升降速测量的具体要求, 尤其是明确了阶次跟踪分析的目的和要求。

CB/T 3853 与 GB/T 15371 和 GB/T 6072.5 对应的测量方法最大的区别是关于测量数据记录和处理的内容, 前者要丰富得多, 得到的信息也多。GB/T 15371 和 GB/T 6072.5 只是在“测试报告”中, 要求“如协议要求有扭转振动测试报告, 则该报告应包含往复式活塞连杆机构驱动的机械的主要数据、轴系布置、按规定(根据需要)的测量参数和测试现场”等, 没有具体记录的数据要求、对数据分析的要求以及结果的指导性建议。CB/T 3853 则在“10 频谱分析、阶次跟踪分析、数据整理及结果表达”中明确规定了对于稳态轴系采用频谱分析, 对于升降速轴系采用阶次跟踪分析, 确定测点在各档转速时的主(副)谐次的振幅; 规定了采用模拟和数字信号分析仪进行分析时的各种要求和注意事项; 给出了记录测量、分析结果的三个记录表格; 明确要求绘制各主(副)谐次测点的振幅或应力变化曲线。

行标 CB/T 3325 是关于船用柴油机扭振评级的, 规定: 评级所需的扭振计算方法应满足《钢质海船入级规范》; 测试方法采用 CB/T 3853; 评级量标即扭振许用应力值则根据不同的情况, 由表 8 给出的不同公式计算得到。注: 表 8 中物理量的说明详见 CB/T 3325—2013。

表 8 扭振许用应力值计算公式

柴油机用途	轴类型	运转工况	计算公式	
主推进	曲轴	持续 $0 < \gamma \leq 1.0$	$[\tau_c] = \pm [(52 - 0.031d) - (33.8 - 0.02d)\gamma^2]$	
		持续 $1.0 < \gamma \leq 1.05$	$[\tau_c] = \pm [(18.1 - 0.011\ 3d) - (87.3 - 0.052d) \sqrt{\gamma - 1}]$	
		瞬时 $0 < \gamma < 0.8$	$[\tau_t] = 2.0[\tau_c]$	
		材料修正	$[\tau'] = \frac{R_m + 184}{614}[\tau]$	
	推力轴、 中间轴、 螺旋桨轴、 艉轴	持续 $0 < \gamma < 0.9$	$[\tau_c] = \pm C_w C_K C_D (3 - 2\gamma^2)$	$C_w = \frac{R_m + 160}{18}$ $C_D = 0.35 + 0.93d^{-0.2}$ C_K 按标准中表 1 选取
		持续 $0.9 \leq \gamma \leq 1.05$	$[\tau_c] = \pm 1.38C_w C_K C_D$	
		瞬时 $0 < \gamma \leq 0.8$	$[\tau_t] = \frac{1.7[\tau_c]}{\sqrt{C_K}}$	
发电； 重要用途辅机； 恒速推进	曲轴、 传动轴	持续 $0.95 < \gamma \leq 1.10$	$[\tau_c] = \pm (21.59 - 0.013\ 2d)$	
		瞬时 $0 < \gamma \leq 0.95$	$[\tau_t] = 5.5\ [\tau_c]$	

根据表 8 分类计算得到的轴系扭振应力许用值，按该标准中评级准则表的应力范围判定其扭转振动性能等级。分别为：A 级为优良工作状态，对系统产生较小继发性激励；B 级为良好工作状态，可长期运行；C 级为可容忍工作状态，系统只能作有限时间运转；D 级为不合格工作状态，存在故障隐患。从该评级准则表可以看出：基本上小于 80% 许用应力的，为 A 级；在 80% 到 100% 许用应力之间的，为 B 级；C 级只适用于推进系统，转速比在 0~0.8 时，应力在持续运转许用应力与瞬态运转许用应力之间，较速比在 0.8~1.05 时，小于持续运转许用应力；超出 A、B、C 级要求的，为 D 级。

由 CB/T 3325 的评价方法可知：首先，扭振评价针对的是轴系，并非仅仅局限于柴油机，因此轴系可能是柴油机曲轴，也可能是传动轴、中间轴等；其次，用于判定等级的测量应力值很关键，因此，测量方法中测点位置的选取、测量条件和工况等均可能影响测量值的大小，一定要严格按照标准操作，且得到相关方的认可。

2 总结

综上所述，得出如下结论：

(1) 现有的船用柴油机振动噪声标准包括两个层面：国家标准和船舶行业标准，基本覆盖了全部的考核指标，包括：振动烈度、振动响应、辐射噪声及轴系振动。

(2) 对于相同的指标、限值和方法，不同的标准大体内容基本相同，但在一些细节、裁剪尺度、可操作性和工程适用性等方面有所不同，有些可能差别较大，须要进一步修订和完善。

(3) 相对来说，对于船用柴油机振动响应的

标准比较欠缺，测试方法不完善，缺乏相应的限值标准，是今后标准制定须考虑的重点。

(4) 一些标准中的“不标准”现象依然存在，如有的指标测试方法和限值分为两个标准，有的合并为一个标准，有的题目是限值，内容又包含了测试方法，这些须统一和“标准化”。

参考文献

- [1] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 中小功率柴油机振动测量及评级：GB/T 7184—2008 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
- [2] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动 第 6 部分：功率大于 100 kW 的往复式机器：GB/T 6075.6—2002 [S]. 北京：中国标准出版社，2002.
- [3] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 机械振动 船舶振动测量 第 4 部分：船舶推进装置振动的测量和评价：GB/T 28784.4—2017 [S]. 北京：中国标准出版社，2017.
- [4] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 船舶机舱辅机振动烈度的测量和评价：GB/T 16301—2008 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 船用柴油机振动评级：CB/T 3256—2013 [S]. 北京：中国船舶工业综合技术经济研究院，2014.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 船用柴油机振动测量方法：CB/T 3154—2011 [S]. 北京：中国船舶工业综合技术经济研究院，2011.
- [7] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 机械振动、冲击与状态监测 词汇：GB/T 2298—2010 [S]. 北京：中国标准出版社，2010.

- [8] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 往复式内燃机 中高速往复式内燃机底脚结构噪声测试规范: GB/T 20787—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [9] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 船用柴油机辐射的空气噪声限值: GB 11871—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 往复式内燃机 噪声限值: GB/T 14097—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [11] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 船用柴油机辐射的空气噪声测量方法: GB/T 9911—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 往复式内燃机 声压法声功率级的测定 第 1 部分: 工程法: GB/T 1859. 1—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [13] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 往复式内燃机 声压法声功率级的测定 第 2 部分: 简易法: GB/T 1859. 2—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 低噪声内燃机电站噪声指标要求及测量方法: GB/T 21425—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 曲轴轴系扭转振动的测量和评定方法: GB/T 15371—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 往复式内燃机 性能 第 5 部分: 扭转振动: GB/T 6072. 5—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. 船用柴油机轴系振动测量方法: CB/T 3853—2011 [S]. 北京: 中国船舶工业综合技术经济研究院, 2011.
- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. 船用柴油机轴系扭转振动评级: CB/T 3325—2013 [S]. 北京: 中国船舶工业综合技术经济研究院, 2013.

(上接第 34 页)

表 4 仿真分析与试验值对比

工况	泵轮转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	涡轮转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	滑差/%	涡轮仿真 转矩/ ($N \cdot m$)	涡轮试验 转矩/ ($N \cdot m$)	误差/%
1	525	516.0	1.714 3	7 555	8 089	6.60
2	550	540.4	1.745 5	8 613	8 867	2.86
3	575	565.0	1.725 0	9 126	9 367	2.57
4	625	614.4	1.696 0	10 735	10 646	0.84

4 结论

本文采用 STAR-CCM + 软件对 JO115X 液力偶合器流场进行仿真计算, 得到了偶合器内部流场的速度、压力分布情况以及涡轮扭矩。仿真结果与试验值对比, 各工况下误差均小于 10%。表明: 仿真计算真实可靠, 为液力偶合器型腔设计提供了一种新手段。

参考文献

- [1] 何延东. 基于 CFD 的大功率调速型液力偶合器设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [2] 张红涛, 侯天柱. 液力偶合器流场仿真软件开发及试验验证 [J]. 柴油机, 2012, 34 (6): 32-36.
- [3] 申国建. 阀控充液型液力偶合器叶轮设计研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
- [4] 杨威崑, 吴凡, 虞俊. 液力偶合器流场的技术仿真 [J]. 机械设计与研究, 2009, 25 (2): 79-82.
- [5] 杨乃乔, 姜丽英. 液力调速与节能 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [6] 沈小文. 限矩型液力偶合器多流动域流场及参数优化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [7] 刘丹丹. 基于 CFD 的液力偶合器流场仿真研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2015.
- [8] 卢秀泉, 胡春玉, 柴亚龙, 等. 大功率液力偶合器调速工况瞬态流场特性 [J]. 吉林大学学报, 49 (5): 1539-1546.
- [9] 侯天柱, 吴凡, 王天驰, 等. 液力偶合器力矩系数 λ_B 的修正 [J]. 机械设计与研究, 2011, 27 (1): 31-34; 38.