

引用格式: 宋汉江, 孙玲, 孙锋. 船舶轴系设计中校验评估的配置化实现方法 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(增刊 1): 114–120.
SONG H J, SUN L, SUN F. Configuration-based realization method for verification evaluation in shafting design of ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(Supp 1): 114–120.

船舶轴系设计中校验评估的配置化实现方法



宋汉江¹, 孙玲^{*2}, 孙锋²

1 海军研究院, 北京 100161

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘 要: [目的] 传统船舶轴系设计等软件中的校验评估模块存在修改调整周期长、校验规则扩展性差等问题, 需要予以解决。为此, [方法] 采用配置化开发思想, 对轴系设计中的评估指标类型进行模式划分, 然后基于这些模式分析设计一套以表达式配置、计算结果配置式提取、计算表达式动态替换、设计结果校验评估为主线的校验评估实现方法。[结果] 构建的设计类软件校验评估模块可以灵活地修改及扩展, 并实现了支持该方法的通用表达式解析器。[结论] 实际船舶轴系设计软件项目应用验证表明, 所提方法可以在不修改程序源代码的情况下支持用户自定义校验评估规则, 并能推广应用至设计类软件开发, 提高相关工作的效率和灵活性。
关键词: 轴系设计; 评估校验; 配置化开发
中图分类号: U664.21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02407

Configuration-based realization method for verification evaluation in shafting design of ships

SONG Hanjiang¹, SUN Ling^{*2}, SUN Feng²

1 Naval Research Academy, Beijing 100161, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: [Objective] The verification evaluation module of traditional shafting design software for ships has several problems which need to be solved, such as a long modification and adjustment period, and poor expansibility of verification rules. [Method] Using the idea of configuration-based development, the types of evaluation indexes in shafting design are divided into different patterns. Based on these patterns, a set of implementation methods for verification evaluation is designed which takes the expression configuration, configuration extraction for calculation results, dynamic replacement for calculation expressions, and verification evaluation for design results as the mainline. [Result] The verification evaluation module of the design software can be modified and extended flexibly, and a general expression parser supporting this method is implemented. [Conclusion] The application verification of ship shafting design software shows that the proposed method can support user-defined verification evaluation rules without modifying the program source code, and can be extended to design software development. As such, this method can improve the efficiency and flexibility of the related work.
Key words: shafting design; verification and evaluation; configuration-based development

收稿日期: 2021-06-08 修回日期: 2021-10-26 网络首发时间: 2021-12-15 09:21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51839005)

作者简介: 宋汉江, 男, 1981 年生, 博士, 高级工程师

孙玲, 女, 1979 年生, 硕士, 高级工程师

孙锋, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师

*通信作者: 孙玲

0 引言

船舶轴系在设计过程中要进行轴系振动、校中及强度等计算,然后根据计算结果来校验评估设计是否合理并反馈指导轴系设计,此校验过程被称之为轴系设计校验评估^[1-3]。现有的船舶轴系设计软件一般包括轴系设计评估模块,通过该模块,即可完成评估工作^[3-4]。在该软件评估功能模块开发过程中,开发人员一般会根据自身对轴系设计评估准则的理解来定义相关的算法及数据结构,然后采用固化的编译模式进行代码编写^[2]。但基于该方式编写的系统只能处理固化的评估规则,程序的扩展性较差,当用户需要对特殊船型的轴系设计增加个性化的评估设定(例如,增加由自身经验所总结的校验评估知识、修改评估结论信息的呈现方式、自定义评估结论字符串、呈现不同语言版本的提示信息等)时,就需要对程序的源代码逻辑进行修改,实现方式不便于修改。当前,在船舶部件辅助性能分析^[5-7]、设计^[8-9]和状态判断^[10-11]领域已开发出很多应用系统,在这些系统中也有类似的设计评估或判断状态问题,但目前在实现方法上普遍存在扩展性不强的问题。针对该类处理方法存在的不足,有必要研究更为合理、高效的处理方法。

为此,本文拟采用软件开发中的配置化思想,首先将轴系设计中的校验评估形式进行模式划分,并依此设计实现相应的表达式解析器,随后在此基础上设计基于配置思想的处理流程。然后,根据评估模式的划分,提炼出需要实现的共性处理方法,并在表达式解析器中将轴系设计校验评估中的共性处理需求进行抽象和实现,例如查表函数、取特定部位负荷函数等,以简化校验评估的表达式配置。最后,以轴系设计中的校中计算校验为例,介绍相应配置信息的描述方法,在开发的轴系设计辅助软件中对该方法进行应用验证,以对比不同配置信息下校验评估结果的差异,证明该方法的有效性。

1 实现方案

为了保证方案设计的合理性,首先对船舶轴系设计中的评估模式和形式进行梳理分析。通过对相关文献^[1-4]和规则^[12]的分析,对评估规则模式简要概括如下。

- 1) 校中计算结果校验。
- 校中计算结果的校验存在以下几种典型形式:
- (1) 评估结论为计算结果与一个绝对值的比

- 较,例如对轴承负荷上限规范的约定,如表 1 所示。
- (2) 根据具体的轴系定义计算出一个相对比例值,然后再根据该比例值进行判断,例如船舶轴系轴承的最小负荷不小于相邻轴承间轴质量及集中负荷之和的 20%。
- (3) 根据设备厂家的要求判断,例如主机轴承按主机厂家的要求、减速箱轴系中大齿轮两端轴承两端的轴承负荷差差应不超过制造厂规定的数值等。

表 1 船舶轴系轴承负荷上限

Table 1 Upper limits of the bearing load of marine shafting

轴承类型	负荷上限值/(N·mm ⁻²)
白合金艉管轴承	0.5
铁梨木艉管轴承	0.3
中间轴承	0.6
主机轴承	按主机厂要求

- 2) 齿轮传动装置轴系的纵振校核。
- 齿轮传动装置轴系纵振校核的特征表现为:计算后,在特定部位提取结果并与规范中约定的绝对值进行比较,例如,连续运转时齿轮轮齿啮合处的振动加速度应为 $a \leq 1.472 \text{ m/s}^2$ 。
- 3) 回旋振动计算的校核。
- 回旋振动计算的校核一般多采用临界转速作为评定依据,其特征为:先根据计算提取特征值,然后再根据轴系的设计运转条件工况与特征值的比例关系进行判断。例如,中国船级社(CCS)规定,对于大功率的推进轴系,其一阶共振转速应超过额定转速 20%;对长跨距轴系及包含万向节的轴系,叶片的次临界转速不应在轴系额定转速范围的 0.85~1.0 倍内出现。
- 基于上述对典型特征的梳理分析,认为轴系设计的校验过程可以提炼成有限类校验模式类型,具体的校验过程可以组织成有限表达式的组合。因此,为了实现配置化的轴系设计评估系统,构建了如图 1 所示的基于配置化方法的逻辑实现方法。
- 该方法有 2 个关键的核心:一是要将校验规则提炼形成相应的基于配置化方法的表达式,并需对这些配置化表达式进行验证确认,以保证表达的合理性;二是要设计一套能对表达式进行解析和处理的表达式解析器。表达式解析器与配置化表达式相互配合、相互依存,如果表达式解析器中设计有特定的处理函数,则表达式配置语句就可以得到简化。同时需注意,在轴系设计过程中,校验过程并不是全部集中在一个点上实施,而是分散在多个点,例如,在校中计算后马上执

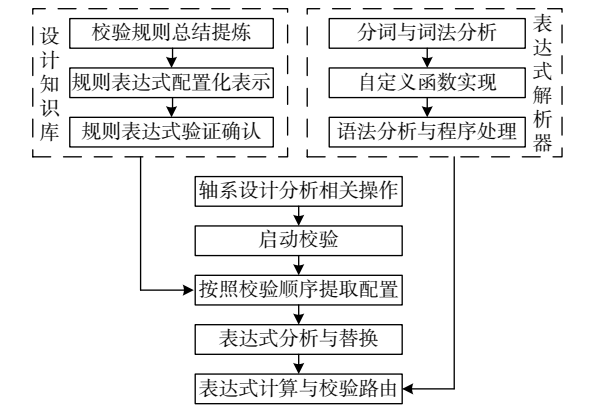


图 1 基于配置化开发思想的系统设计实现流程

Fig. 1 Process of system design and implementation based on configuration development

行校中的校验,在强度计算后执行强度校验等;另外,在同一个分析模块的校验点上,也可能存在多个校验规则,这就需要定义校验规则的路由,即先后顺序关系,而这正是基于配置化方法的突出优点,其很容易实现校验规则先后顺序的调整。因此,该方法实现的核心是表达式解析器的设计与实现,需要针对轴系设计校验评估过程进行相应处理方法的提炼和封装。

在具体的轴系设计过程中,系统首先读取配

置信息,根据配置信息进行校验过程的路由判断,然后通过配置信息分析需要获取的数据来源和需要处理的表达式,接着,再依据配置信息进行表达式中特定占位符的替换、表达式的词法分析和语法分析,最终变成相应的运算处理语句,并得出相应的校验评估结论。在该方法中,船舶轴系设计评估规则以配置信息的形式存在,若要更改评估规则,只需替换配置信息即可,提高了系统扩展性。

2 关键技术

2.1 评估规则的模式划分

在具体实现过程中,首先需要针对船舶轴系设计软件中的评估规则进行模式划分。本文将根据规则的评估内容类型、合格判据类型等进行轴系设计评估模式划分,不同的模式可以由相应的程序处理逻辑和计算语言来描述。船舶轴系设计评估的表示模式可以划分为以下几种类型:常量、表达式、数组/链表、表格等,基于此,设计了按照判据内容进行划分的模式,示例内容如表 2 所示。

表 2 按判据内容划分的分类

Table 2 Classification based on criterion content

模式名称	判据内容	算法描述
常量	振动加速度 $a \leq 1.472$	定义常量 a ,按照相关规定赋值
表达式	厂家未指定时,取不超过两轴承间轴段质量与大齿轮质量之和的20%	定义变量 M_1, M_2, M_3 ,获取变量值,其计算表达式为: $(M_1+M_2+M_3) \times 20\%$
数组/链表	不小于相邻两轴承间轴质量及集中负荷之和的20%	根据当前轴承位置定位到相邻轴承位置,获取数组/链表中相邻轴承位置之间2个轴段的质量及集中负荷之和
表格	见表1轴承负荷上限表	根据特定轴承类型查询表1,获取正负负荷上限值

2.2 表达式解析器

在设计基于配置方式进行船舶轴系设计的校验评估过程实现方法中,具体校验信息会转换成类似 Matlab 脚本语言的配置信息,而程序若要对配置信息进行操作处理,则必须要有一个在程序运行时动态解析表达式的小型编译器。例如,在校中计算后,需要校验每个轴承负荷是否满足要求,一般需要写一段对应的函数来单独进行处理;而采用配置方法,则写出“F_each (BearingNo)≤{查表(1001, ‘BearT’)}”这样的一个描述语句,但程序本身并不能理解该语句,这就需要有对应的表达式解析解来进行翻译。该表达式解析器能进行分词、语义分析、逻辑判断和调度等工作。本文所设计的表达式解析器运行流程如图 2 所示。

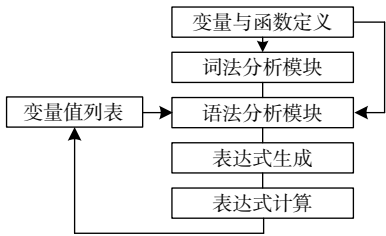


图 2 表达式解析器的运行流程

Fig. 2 Operational process of expression interpreter

关键组成模块及其功能说明如下:

1) 变量和函数定义模块。

该模块中定义了一些特殊的变量或自定义函数。例如,变量 π 代表圆周率,函数 $\text{Max}()$ 代表取最大值等,同时,还必须要有对应的函数实现。后续阶段,在词法分析器中需要根据此处的定义来判断其是否是自定义函数或变量,模块定义的

变量或函数均会变成解析器的保留关键词。

2) 词法分析模块。

该模块中将表达式各部分拆分为独立且不可再拆分的单词和运算符等, 然后再判断特定单词是保留关键词还是用户定义变量。

3) 变量值列表模块。

该模块用于保存系统运行到当前时刻时已输入变量值和已产生结果的表达式计算值等, 即多个表达式可以嵌套, 已计算的表达式结果保存到该列表中, 以方便后续表达式的使用。

4) 语法分析模块。

该模块在词法分析输出的基础上构造语法分析树, 最常见的表达式语法单位为算术表达、逻辑表达等。语法分析模块需根据变量名从已保存的变量值列表中取值来替换表达式中的变量, 或根据函数名调用函数。

5) 表达式生成与计算模块。

该模块根据输入值或前面步骤产生的值, 实

现将字符串中的变量进行替换后的计算功能。本质上, 表达式生成是在语法分析模块中完成的, 在表达式的语法分析完成后, 表达式中将没有变量, 而只有数值、加减乘除、特定函数名及括号等运算符。

完整的表达式解析是词法和语法分析等结合的过程, 其核心是词法和语法分析, 但核心逻辑实现后基本不需要变化。针对本文工作场景, 为更好地适应船舶轴系设计中的校验分析, 解析器的运行主要集中于自定义函数的声明和实现方面; 需定义一些相应的处理函数, 以简化表达式的配置及解析。

2.3 验证规则的表达式配置设计

前面梳理的校验规则需要采用表达式进行配置表示与存储, 才能方便后续使用。设计的存储结构主要内容示例如表 3 所示。

表 3 中, “表达式定义”是程序运行中真正传

表 3 轴系设计评估规则存储表

Table 3 Storage table of evaluation rules for shafting design

适用模块	表达式描述	表达式定义	校验输出提示
轴系校中	艉轴架轴承处截面转角值应 $\leq 3\times 10^{-4}$ rad	截面转角值(艉轴架轴承) $\leq 0.000\ 3$	艉轴架轴承处的转角为{截面转角值(艉轴架轴承)}, {已/未}超过 3×10^{-4} rad, {满足/不满足}要求
轴系校中	每个(轴承负荷) $\leq$ {查表(轴承正负荷上限表)}	$F_each(BearingNo)\leq$ {查表(1001, 'BearT')}	轴承负荷上限值{满足/不满足}要求
轴系校中	轴承最小正负荷不小于相邻轴承间轴质量及集中负荷之和的20%	$F_each(BearingNo)\geq 20\%\times ShaftWP(BearingNo)$	轴承负荷均匀性{满足/不满足}要求
.....			

递给表达式解析器执行的语句, “表达式描述”则是为了方便配置信息的显示与查询, “校验输出提示”是程序校验后显示给用户的提示信息。这里, “校验输出提示”可以很容易地修改为不同的语言版本。截面转角值、F_each 和 ShaftWP 等是 2.2 节所描述表达式解析器中定义的一批自定义函数, 通过这些自定义的函数, 方便表达式配置和表达式计算。表达式解析器是自行开发的, 其支持中英文定义的函数或是运算符。“BearingNo、艉轴架轴承”等则是定义的一些特殊变量, 这些变量在轴系设计中需要通过参数、计算中间变量等赋值到图 2 所示定义的“变量值列表”中。而具体的轴承位置值、轴承位对应的负荷值、转角值等将会以表格变量的形式保存到列表, 并通过轴承号位置来检索, 相关的处理函数均封装到表达式解析器中。

校验规则的逻辑判断实现流程如图 3 所示。在逻辑判断中, 还需要支持分支的情况, 例如配置表达式“逻辑判断(表达式计算, 结果符合时执

行, 结果不符合时执行)/IIF(逻辑表达式, 值为真的情况分支, 值为假的情况分支)”, 通过表达式的计算结果是否符合要求来确定后续的分支走向。

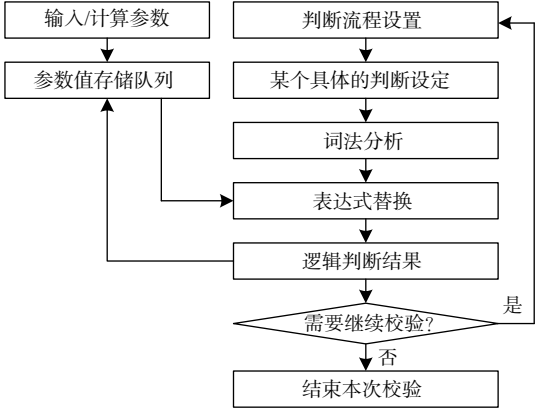


图 3 校验规则逻辑判断解析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of logical judgment and analysis of verification rules

3 应用效果

根据图 2 所示配置信息, 在输入具体轴系参数进行校中计算后, 将根据校验规则流程, 按照

设定的顺序进行校验并给出相应的提示,效果的示意如图 4 所示。

若对表 3 示例的内容进行修改,修改后的内容示如表 4 所示,表中将修改部分以粗体方式进行了标识以便查看。主要修改如下:

1) 调整校验规则顺序,即将表 3 中的规则序号 3 调整为规则序号 1;

2) 将“尾管后轴承支点处轴转角值”调整为 $\leq 0.2 \times 10^{-4} \text{ rad}$ ”;

3) 将每类轴承的上限负荷校验结论调整为都输出显示;

4) 增加了一条“多个中间轴承时最大负荷和最小负荷的差值不能超过某个绝对值”的示例性校验规则。

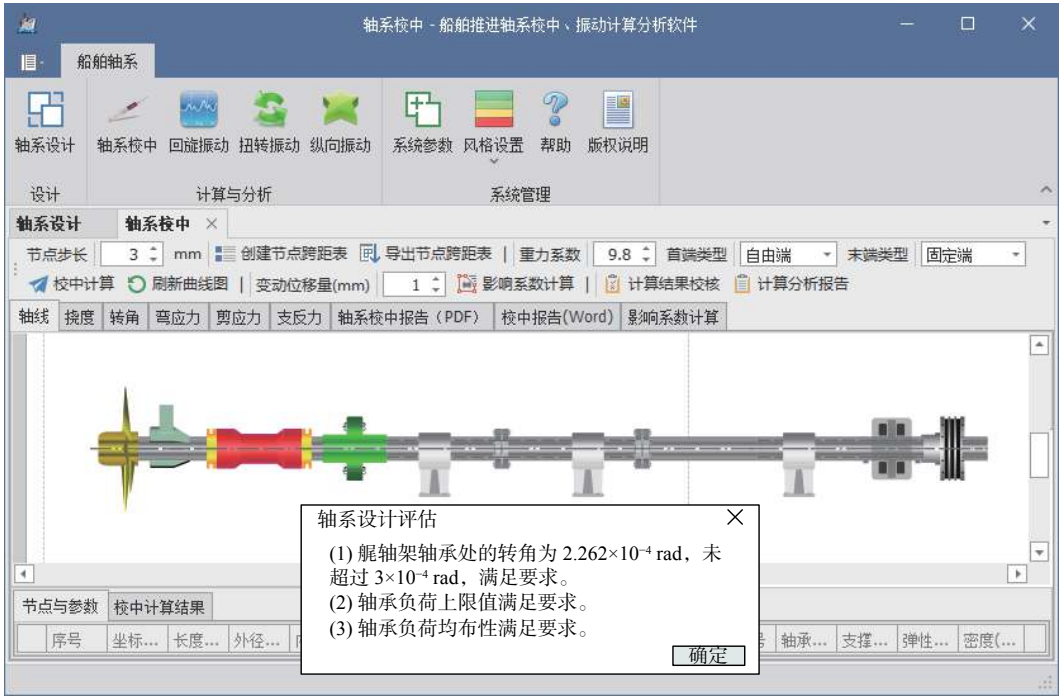


图 4 计算评估结论示例

Fig. 4 Example of calculation and evaluation conclusion

表 4 轴系设计评估规则存储表修改示例

适用模块	表达式描述	表达式定义	校验输出提示
轴系校中	轴承最小正负荷不小于相邻轴承间轴质量与集中负荷之和的20%	$F_{each}(BearingNo) \geq 20\% * ShaftWP(BearingNo)$	轴承负荷均布性{满足/不满足}要求
轴系校中	艉轴架轴承处截面转角值应 $\leq 2 \times 10^{-4} \text{ rad}$	截面转角值(艉轴架轴承) ≤ 0.0002	艉轴架轴承处的转角为{截面转角值(艉轴架轴承)}, {已/未}超过 $2 \times 10^{-4} \text{ rad}$, {满足/不满足}要求
轴系校中	循环输出 {每个(轴承负荷) $\leq$ {查表(轴承正负荷上限表)}}	$FEachOut[F_{each}(BearingNo) \leq \{查表(1001, 'BearT')\}]$	循环输出每类轴承 {轴承负荷上限值{满足/不满足}要求}}
轴系校中	中间轴承负荷差值应在10 kN内	$Max(中间轴承)-Min(中间轴承)<10$	中间轴承负荷绝对差值为{绝对差值}kN, {已/未}超过10 kN, {满足/不满足}要求
.....			

在程序不进行任何修改,输入参数也不变化的情况下,其评估计算后的结论会发生变化,如图 5 所示。

结合表 3 和图 4,表 4 和图 5,在表 4 中对校验规则顺序进行了调整,增加了校验规则,在图 5 中反应了相应的提示信息的变化。由图 5 可以看出,程序输出的校验提示信息完全取决于对应表中存储的配置信息,校验的提示信息顺序、提示信息的详细程度、校验规则数量等都可以配置式

修改,而不需要对程序进行任何修改,实现方式灵活性非常强。

将表 4 中的校验规则“ $Max(中间轴承)-Min(中间轴承)<10$ ”修改为“ $Max(中间轴承)-Min(中间轴承)<5$ ”,同时,将校验输出提示“中间轴承负荷绝对差值为{绝对差值}kN, {已/未}超过 10 kN, {满足/不满足}要求”修改为“中间轴承负荷绝对差值为{绝对差值}kN, {已/未}超过 5 kN, {满足/不满足}要求”,程

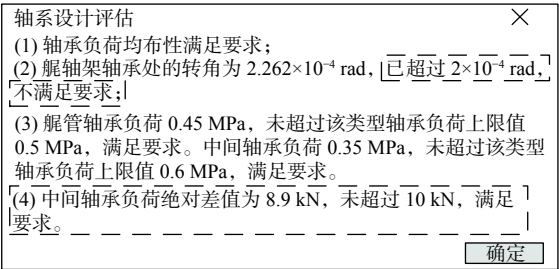


图 5 修改后的计算评估结论示例

Fig. 5 Example of modified calculation and evaluation conclusion

序不需要做任何修改, 相同轴系设计参数再次运行后的校验结论如图 6 所示。

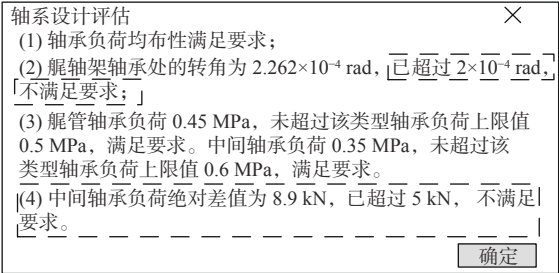


图 6 修改评估结论提示外观的示例

Fig. 6 Example of modifying the appearance of evaluation conclusion tips

由图 6 可以看出, 在提示信息的输出上, 还可以支持标记语言, 用于进行格式的标记, 这样提示信息会更加直观, 同时也可以配置调整, 而无需对程序进行修改。

当需要实现其他语言的提示信息版本时, 通过修改程序界面控件的语言信息只能实现界面的语言变化, 并不能实现程序运行后的提示信息语言版本的切换。但采用本文方法, 只需要将表 3、表 4 所示“校验输出提示”列中的模板替换为其他语言信息即可。图 7 所示为英语版的评估结果示意图。

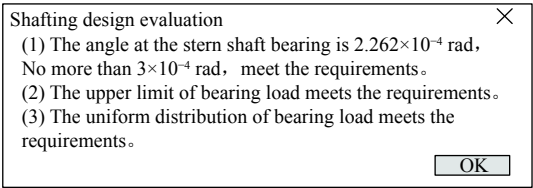


图 7 英语版评估结果示意图

Fig. 7 Schematic diagram of evaluation results in English version

4 结 语

本文针对现有船舶轴系设计软件中校验评估功能模块存在的不足, 提出了一种基于配置化思想的实现方法。通过对船舶轴系设计过程中的相关设计规范和校验规则进行分析总结, 提炼出了需要实现的相应校验评估处理模式需求, 同时还对轴系设计中的评估指标类型进行了模式划分,

并基于这些模式分析设计了一套以表达式配置、计算结果配置式提取、计算表达式动态替换, 以及设计结果校验评估为主线的校验评估实现方法, 并进行了实现验证。采用本文方法可以改进传统方式设计中系统扩展性和通用性差的缺点, 并已在实际轴系辅助设计软件、船舶动力系统状态辅助识别软件中得到集成应用。

在轴系设计等工程应用软件中, 应大力提倡可配置化的实现模式, 可将配置化方法广泛应用到软件界面风格、界面布局、计算分析过程、计算结果校核评估、计算结果呈现、分析结果报告生成、图形文件绘制等方面。采用该方法, 可以实现在对应的程序完全不修改的情况下, 由用户调整校验规则的路由顺序、规则的基准值、规则的启用或停止和新增规则等, 可以调整校验结论的输出顺序、结论的输出形式等。该方法不仅可以用于船舶轴系设计软件中的校验分析环节, 同时也可用于船舶部件辅助性能分析、船舶部件辅助设计、船舶部件状态识别与故障诊断领域等所有需要应用知识表达与知识评估的场合, 具有较强的通用性。

参考文献:

[1] 赖国军, 刘金林, 雷俊松, 等. 船舶推进轴系方案设计的 关键技术研究进展 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(5): 10–21.
LAI G J, LIU J L, LEI J S, et al. Progress in studies on key technologies for marine propulsion shafting scheme design[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(5): 10–21 (in Chinese).
[2] 刘文吉. 配置式船舶轴系设计系统关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
LIU W J. Research on the key technologies of configuration design system with ship shafting[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017 (in Chinese).
[3] 杨红军. 某冰区航行船舶轴系扭转振动计算分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
YANG H J. Torsional vibration calculation and analysis for ice class ship[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016 (in Chinese).
[4] 周瑞平, 杨建国, 张升平. 船舶推进轴系扭转振动应用 软件开发研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(3): 69–72.
ZHOU R P, YANG J G, ZHANG S P. Software develop- ment of marine shaft torsional vibration on martrix VB[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(3): 69–72 (in Chinese).
[5] 杨亢元, 肖鹏安, 李伟光. 基于知识组件的船舶空调通 风系统原理图快速生成方法 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(2): 71–77.
YANG K K, XIAO P A, LI W G. Schematic rapid gen- eration method for ship air-conditioning ventilation sys-

tem based on knowledge component[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(2): 71–77 (in Chinese).

[6] 卢雨, 顾朱浩, 王瑞宇. 基于 CAD 与 CATIA 二次开发的船体快速建模方法 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(6): 121–127.
LU Y, GU Z H, WANG R Y. Rapid hull modeling methodology based on CAD and CATIA secondary development[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(6): 121–127 (in Chinese).

[7] 陈志飏, 王娜, 张净宙, 等. 基于 .NET 平台的插件式船舶工程计算系统应用框架开发 [J]. *计算机应用*, 2010, 30(增刊 1): 225–226, 229.
CHEN Z B, WANG N, ZHANG J Z, et al. Development of plug-in ship assess application framework based on .NET[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(Supp 1): 225–226, 229 (in Chinese).

[8] 陈志飏, 陈庆任, 朱显玲. 三维船体建模与稳性计算系统研发 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(3): 60–66.
CHEN Z B, CHEN Q R, ZHU X L. Research and development of 3D hull modeling and stability calculation system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(3): 60–66 (in Chinese).

[9] 秦帅帅. 船体三维参数化建模及稳性计算软件开发 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
QIN S S. 3D parametric modeling and stability calculation software development of ship hull[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019 (in Chinese).

[10] 刘峻华, 孟清正, 杨涛, 等. 船舶动力装置可组态智能故障诊断系统设计 [J]. *中国舰船研究*, 2011, 6(2): 77–80.
LIU J H, MENG Q Z, YANG T, et al. Design of the configurable intelligent fault diagnosis system of marine power plant[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2011, 6(2): 77–80 (in Chinese).

[11] 张凡, 李良才, 汤涛, 等. 基于大数据的船舶动力装置全寿期综合保障系统设计 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(增刊 1): 92–97.
ZHANG F, LI L C, TANG T, et al. Design of full life-cycle integrated logistic support system for marine power equipment based on big data[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(Supp 1): 92–97 (in Chinese).

[12] 中国船级社. 钢质海船入级与建造规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
China Classification Society. Steel ship specification of classification & shipbuilding[M]. Beijing: China Communications Press, 2015 (in Chinese).



(上接第 96 页)

[6] CUI J J, WANG D Y. An experimental and numerical investigation on ultimate strength of stiffened plates with opening and perforation corrosion[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 205: 107282.

[7] DOAN V T, LIU B, GARBATOV Y, et al. Strength assessment of aluminum and steel stiffened panels with openings on longitudinal girders[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 200: 107047.

[8] LIU B, GAO L J, AO L, et al. Experimental and numerical analysis of ultimate compressive strength of stiffened panel with openings[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108453.

[9] 郑少平, 陈静, 程远胜, 等. 代理模型技术及其在船舶板架强度和稳定性计算中的应用 [J]. *中国造船*, 2013, 54(1): 40–51.
ZHENG S P, CHEN J, CHENG Y S, et al. Surrogate models and their application in calculation of strength and stability of ship grillage[J]. *Shipbuilding of China*, 2013, 54(1): 40–51 (in Chinese).

[10] 陈静, 詹大为, 刘江鹂, 等. 基于 Kriging 模型的船舶典型双层底板架强度和稳定性全局敏度分析 [J]. *中国舰船研究*, 2014, 9(1): 72–80.
CHEN J, ZHAN D W, LIU J Y, et al. Kriging model-based global sensitivity analysis of strength and stability for ship grillages[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2014, 9(1): 72–80 (in Chinese).

[11] 张峰, 何书韬, 刘均, 等. 基于代理模型的集成上层建筑开口群角隅应力分析 [J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(5): 41–46.
ZHANG F, HE S T, LIU J, et al. Stress analysis of the opening area of the ship integrated superstructure based on surrogate models[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(5): 41–46 (in Chinese).

[12] 刘俊杰, 胡嘉骏, 蒋彩霞, 等. 甲板舷侧大开口结构应力集中分析及钢模试验 [J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(2): 51–56, 102.
LIU J J, HU J J, JIANG C X, et al. Research on stress concentration and steel model test for deck broadside with large opening[J]. *Ship Science and Technology*, 2013, 35(2): 51–56, 102 (in Chinese).

[13] 王东海, 李润培, 杜忠仁, 等. 1700 TEU 集装箱船甲板大开口强度分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2002, 36(1): 107–111.
WANG D H, LI R P, DU Z R, et al. Comparison of the large deck opening strength assessment of 1700 TEU container carrier according to GL and ABS Rule[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2002, 36(1): 107–111 (in Chinese).

[14] 蔡乾亚, 杨永谦, 裘泳铭. 集装箱船舱口角隅的应力集中及其结构形式 [J]. *上海交通大学学报*, 1996, 30(8): 125–129.
CAI Q Y, YANG Y Q, QIU Y M. Research on stress concentration and structure models of container ship hatch corner[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 1996, 30(8): 125–129 (in Chinese).