

doi: 10.7690/bgzdh.2019.11.010

# 风洞常规天平结构设计优化方法及支持平台

易国庆, 史玉杰, 米 鹏

(中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为满足风洞高精度、高可靠性测量需求, 设计开发了一种基于 C/S 和 B/S 共存架构的分布式优化软件平台。在常规天平结构设计优化方法的基础上, 使用该平台可以让多用户同时开展天平结构的在线设计优化与验证计算。通过对天平优化设计涉及到的各种因素进行分析, 结合多种软件及优化策略, 利用对各种软件的二次开发与封装, 构建提升常规应变天平的优化支持平台。试验结果表明: 该平台能完成天平的远程设计及验证计算, 提高了天平设计质量和效率。

**关键词:** 应变天平; 优化设计; 软件平台; 过程封装

**中图分类号:** TP311 **文献标志码:** A

## Optimization Method and Support Platform for Wind Tunnel Conventional Balance Structure Design

Yi Guoqing, Shi Yujie, Mi Peng

(High Speed Aerodynamics Research Institute, China Aerodynamics Research &amp; Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** A distributed optimization software platform based on C/S and B/S coexistence architecture is designed and developed to meet the requirements of wind tunnel force measurement with high accuracy and reliability. On the basis of the conventional balance structure design optimization method, the platform can make multi-users simultaneously carry out online design optimization and verification calculation of the balance structure. Through the analysis of various factors involved in the optimization design of balance, combined with a variety of software and optimization strategies, using the secondary development and encapsulation of various softwares, an optimization support platform for upgrading conventional strain balance is constructed. The experimental results show that the platform can complete the remote design and verification calculation of the balance, and improve the quality and efficiency of the balance design.

**Keywords:** strain balance; optimum design; software platform; process encapsulation

### 0 引言

随着航天航空工业技术的快速发展, 对风洞试验测试的精度要求越来越高, 而天平是风洞试验中最常用的测量设备之一, 其自身结构设计合理性对于测量精度有很大的影响。目前在天平设计上存在以下不足:

1) 设计广度分析。天平主要设计方式为单机手动分析计算, 由于天平是多轴同时测量, 加上温度、应变、刚度、强度等多要素相互制约, 在实际设计过程中往往侧重于其中某一个要素, 导致最终完成的设计方案水平高低不一<sup>[1]</sup>。

2) 设计深度分析。在以往的设计环节中, 通过计算结果, 设计人员往往只能得出设计有益的方向, 得到定性的一个结果, 而不知该具体数值是否属于最优解。

3) 设计效率分析。在设计环节中需要使用

ANSYS、CATIA、EXCEL、Isight 等多种软件, 而各种软件都是相互独立使用。设计过程需要将上次仿真结果参数代入下一次的计算, 该过程需要人工填写, 反复多次, 数据容易出错且效率低下。

基于以上分析, 笔者结合目前相对固定的设计流程, 梳理了天平结构设计的优化流程, 明确了常规天平的多种优化目标, 融合了多种软件及优化策略<sup>[2]</sup>, 建立了高精度常规天平结构优化设计平台。

### 1 结构设计及优化方法

#### 1.1 优化目标确定

为了设计出高质量天平, 首先必须确立对天平的结构优化目标。优化目标主要内容包括: 天平结构的强度、刚度、灵敏度、应变计粘贴位置最大应力、分量之间的相互干扰、结构热变形以及天平的几何结构等<sup>[3]</sup>。优化目标函数为:

收稿日期: 2019-05-24; 修回日期: 2019-07-14

作者简介: 易国庆 (1984—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事风洞应变天平研制与应用, 试验数据采集与处理研究。E-mail: myxiaoy@qq.com。

$$F(x) = \sum_i W_i \frac{f_i(x)}{S_{f_i}} \quad (1)$$

式中： $f_i(x)$ 为各优化目标的目标值； $S_{f_i}$ 为目标比例因子； $W_i$ 为目标权重。优化目标设置时，应设定合适的比例因子，将优化目标值限定在同一个数量级范围，根据天平性能特点设置各个目标的权重。

天平结构的强度决定着风洞试验的安全。强度通过 ANSYS 有限元分析进行评判，分析结果中最大 von Mises 等效应力必须小于天平材料的许用应力  $\sigma_0/n$  ( $n$  为材料安全系数)<sup>[4]</sup>。此外，使用等强度梁粘贴应变计测试极限应变，得知区域最大应力一般不超过 400 MPa，否则将影响天平的长期读数稳定性。设计平台将天平在全载荷作用下的变形作为天平的刚度进行优化，其判断标准为变形最小。

### 1.1.1 灵敏度设置

灵敏度是应变天平设计的一个重要指标，如果将灵敏度确定为优化目标，1 台六分量天平将多出 6 个优化目标，使得天平优化的难度大大增加。为了降低优化难度，笔者在优化开始前将天平的灵敏度作为优化的约束条件进行设置。天平的设计灵敏度是天平各分量敏感元件的应变值和电阻应变计灵敏度系数的乘积，在天平的优化过程中，将敏感元件的应变值代替灵敏度进行优化。

德国达姆施塔特工业大学 (technische universität darmstadt, TUD) 对应变计的最大分辨率进行了研究。TUD 认为应变计的最大分辨率取决于应变计敏感栅的热噪声 (thermal noise)，与电子测量及通信技术中遇到的问题类似。通过对应变计敏感栅的热噪声的计算，可以得出应变计的最大分辨率为  $0.5 \times 10^{-9}$ ，现有的高性能测量装置也能满足该分辨率的测量，所以应变计的分辨率不是限制天平灵敏度下限的因素。TUD 通过对应变计的灵敏度自补偿和温度自补偿以及天平材料特性等进行研究后认为，天平的分辨率和重复性分别为 0.01 和 0.1  $\mu\text{V}/\text{V}$ 。假设给 1 台天平供电 10 V，其分辨率和重复性分别为 0.1 和 1  $\mu\text{V}$ ，天平在设计时的灵敏度不应成为限制最终天平不确定度的主要因素。将天平的不确定度提高到 0.1%，那么天平的重复性误差不宜超过 0.033% (天平不确定度的 1/3)，所以天平设计时灵敏度的下限可以确定为 0.3 mV/V，即天平的设计应变下限为  $1.5 \times 10^{-4}$ 。其上限值基于天平整体结构刚度决定<sup>[5]</sup>。具体见表 1。

表 1 天平应变推荐范围

常规天平	推荐范围
$Y$	$1.5 \times 10^{-4} \sim 7.5 \times 10^{-4}$
$M_x$	$1.5 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-4}$
$X$	$1.5 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-4}$
$M_y$	$1.5 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4}$
$Z$	$1.5 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4}$
$M_z$	$1.5 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4}$

### 1.1.2 相互干扰量优化

天平各分量之间的相互干扰主要是由于天平元件在相应载荷作用下的变形、加工误差、组成测量电桥的性能参数差异以及粘贴位置偏差造成的，相互干扰大的天平难以达到高的测量精度和准确度。天平的校准隐式如下 (干扰项取到 2 阶)<sup>[6]</sup>：

$$F_i = a_i \Delta V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 b_i^j P_j + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=j}^6 c_i^{jk} P_j P_k, \quad (i=1, 2, \dots, 6). \quad (2)$$

式中： $F_i$ 为天平第  $i$  个分量的载荷测值，N 或  $\text{N} \cdot \text{m}$ ； $P_j$  和  $P_k$  为对第  $i$  分量产生干扰的第  $j$  和第  $k$  分量载荷，N 或  $\text{N} \cdot \text{m}$ ； $a_i$  为第  $i$  分量的主项系数，N/mV 或  $\text{N} \cdot \text{m}/\text{mV}$ ； $b_i^j$  为其他分量载荷对第  $i$  分量的线性干扰系数； $c_i^{jk}$  为各分量载荷对第  $i$  分量的平方干扰系数 ( $j=k$  时) 和交叉干扰系数 ( $j \neq k$  时)。

当进入迭代计算最终值过程中，载荷值  $F_i$  第  $N$  次迭代计算不稳定结果会被代入到  $F_j$  的迭代计算，从而将误差代入，如果干扰系数  $b_i^j$  和  $c_i^{jk}$  较小，那么  $F_j$  的误差值就更小，所以在结构设计中要求相互干扰越小越好。对于常规杆式天平，在设计上，除轴向力分量外，组合测量元件为对称结构，且应变计粘贴位置也相应对称，组合成惠斯顿测量电桥后相互之间的干扰均较小，可以不予考虑，但对于轴向力分量而言，由于轴向力弹性支撑系统的非对称性，其余分量尤其是升力  $Y$  不可避免地会对其产生干扰。研究表明：法向力对轴向力分量的干扰最大，所以将法向力对轴向力的干扰作为目标之一进行优化，判断标准为法向力对轴向力的干扰小于或等于 10%。

### 1.1.3 天平结构热输出优化

常规天平两端的组合测量元件都是结构对称的，在天平存在温度梯度的情况下，组合元件同一截面上的温度是一致的，而天平的应变计粘贴位置均在同一截面上或同一测量电桥的相邻 2 个电阻应变计在同一截面上，所以通常情况下天平的组合测

量元件从结构上不会引起天平的温度效应，热分析时不将其作为优化目标。

天平的轴向元件由支撑片和测量梁组成。在工作过程中，天平体的温度梯度将导致结构热变形。由于支撑片和测量梁的跨度较大，必然存在着结构热变形不一致的情况，所以这里将轴向力测量梁的结构热变形作为优化目标之一，评判标准为结构热变形引入的轴向力输出相对其设计输出小于或等于 5%。常见天平结构热输出分析结果见图 1。

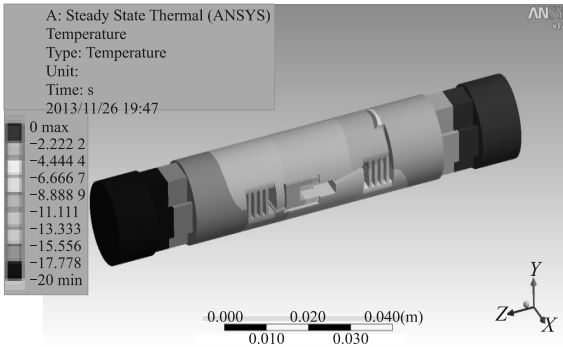


图 1 天平结构热输出分析计算云图

### 1.2 优化策略

天平结构设计优化是为了设计出性能优良的风洞天平。但天平的优化目标众多，设计优化过程实际属于一个多目标最优化问题。多数情况下，各个子目标可能是相互冲突的，一个子目标的改善有可能引起另一个子目标性能的降低，也就是说，要使多个子目标同时达到最优是不可能的(相互关系见图 2)，只能在它们中间进行折中处理，使各个子目标函数尽可能达到最优。对多个子目标同时实施最优化的问题称之为多目标优化问题。设计平台根据输入的约束条件和优化目标，通过优化算法对不同方案进行上万次甚至几十万次的搜索和评估，从而最终找到最优解集。

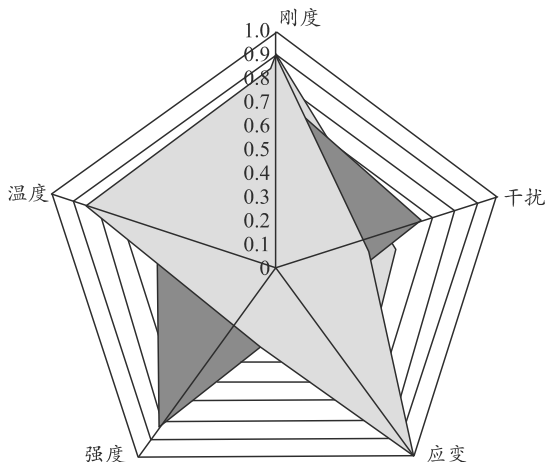


图 2 天平结构优化设计因素相互关系

设计平台采用 NSGA-II 遗传算法的优点在于探索性能良好，进化过程中，导入了“拥挤距离”和“拥挤距离排序”的方法，将当前父代群体进行交叉和变异得到子群体，将 2 个群体合并。在目标空间中按照 Pareto 最优关系将群体中个体两两按其目标函数向量进行比较，将群体中所有个体分成多个依次控制的前沿层。在属于不同的 Pareto 层的情况下，利用评价 Pareto 优越性来评价个体的优劣。属于同一个 Pareto 层的个体，具有更大的拥挤距离的个体更优秀<sup>[7]</sup>。

设计平台优化算法选择界面见图 3。NSGA-II 算法优化过程为：当设置完初始参数后，进行第一代进化，此时系统无法预知方向，只在初始条件下进行试探性质的计算，在约束条件下(微应变值落在设置区间内)，根据计算结果与目标函数(天平刚度最大、各元之间交叉干扰最小)的相近程度进行筛选，将较好的结果(天平的结构参数)保留下来放入第二代，将其作为父本再进行交叉进化计算，根据计算结果再次重复筛选过程，将较好个体进入第三代进化，此时将同时进行个体自身变异以及个体间的交叉进化计算，重复迭代以上过程，最终得到与目标函数相符合的最优解集。



图 3 NSGA-II 进化计算参数设置界面

## 2 设计软件平台研制

### 2.1 设计平台建设目标

根据以上分析，笔者针对常规风洞高精度、高可靠性应变天平的研制需求，研制出高精度应变天平设计平台，梳理出常规天平优化目标，明确优化参数，针对设计中的关键结构技术问题提出解决方案和控制标准，规范天平设计细节，实现多用户计算机自动化设计，全面提升常规应变天平设计水平。高精度常规天平结构优化设计平台如图 4 所示。

设计平台主要基于现有的各种软硬件条件下建

立起来，采用了 ANSYS、CATIA、EASA、EXCEL、Isight 等商业软件，通过对各种软件的二次开发与封装，最终形成以网页形式呈现的优化设计平台。该网页可填写各种设计参数与优化目标(见图 5)，提交远程服务器计算完成后，查看和下载计算结果。



图 4 常规天平结构优化设计平台

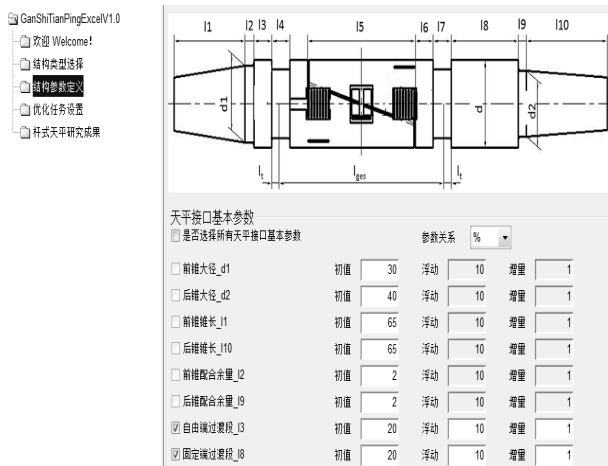


图 5 设计平台结构尺寸参数填写界面

## 2.2 优化设计流程

根据已经成熟的设计优化流程，设计平台将其分为 EXCEL 初步优化流程和 ANSYS 详细优化流程：EXCEL 初步优化主要是将结构静力学公式内置到 EXCEL 中，然后用 Isight 集成进行反复迭代算出应变值；ANSYS 详细优化流程则是使用 ANSYS 的 APDL 语言进行天平数模建立、网格划分、参数预置、后处理等，利用 Isight 集成 ANSYS 进行详细的计算优化迭代，最终驱动 CATIA 生成优化的天平结构。

当完成 EXCEL 初步优化后人为判定选择结构，再将其导入到 ANSYS 详细优化计算。2 种流程在使用上相互独立，但使用方式类似，均为输入初始条

件、优化目标等参数后，提交给远程服务器进行仿真分析，优化计算完成后通过网页形式查看、下载结果。所有优化计算均放置于服务器，可以多用户同时设计计算。图 6 为天平自动设计优化流程。

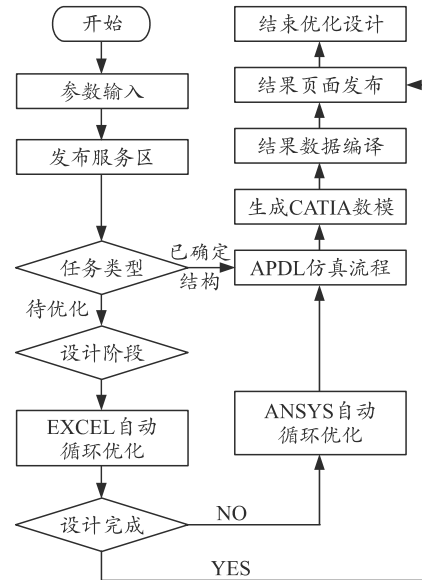


图 6 自动设计优化流程

## 2.3 设计平台的主体框架

设计平台主要包括 ANSYS、CATIA、EASA、EXCEL、Isight 等商业软件。这些软件的数据文件不能完全通用，因此，对这些商业软件进行了二次开发，定义了统一的参数输入输出文件。其中利用 APDL 语言对 ANSYS 有限元分析过程进行了参数化，实现了 3D 模型自动建模、前处理和结果提取并保存为数据结果输出文件。编写了 CATIA 环境下参数化建模和参数自动更新的 VBS 脚本文件。EASA 直接面向用户，开发了界面友好的 GUI，用于接受用户的设计输入，通过定义统一的参数文件接口完成数据传递和更新<sup>[7-8]</sup>。

图 7 给出了设计平台的软件系统的层次结构。基于 EXCEL、ANSYS 和 CATIA 二次开发组件集成到 Isight 系统中，访问和使用通过 EASA 的网页访问形式，整个优化平台开发的组件均存储在服务器上，所有的计算分析工作通过应用程序服务器完成，结果数据存储在数据服务器上，用户通过网络服务器访问这些数据。通过这种方式，每一个天平设计人员均使用统一被封装在服务器端的天平优化设计模块，设计质量有了下限保证，而集成了最新天平设计理念的设计平台，利用强大的服务器计算机资源，划分出更细网格，从而能够得到更高质量的仿真计算结果。

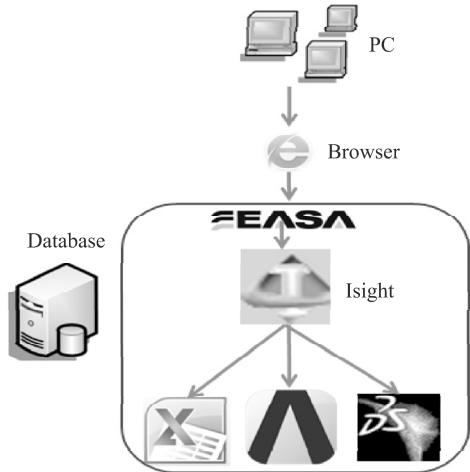


图 7 优化平台层次结构

设计平台主要完成 APDL 参数化模板解析、CATIA VBS 脚本命令解析、Input 数据读取、Output 优化方案写入、几何结构尺寸链判断及优化组件的参数化配置，在 Simflow 流程集成界面中通过拖拽方式搭建优化流程。将流程图中 Calculator 组件用到的尺寸参数与 Optimization 组件的参数建立映射关系(见图 8)。在流程线上增加条件判断，当优化方案可以满足几何拓扑关系，进入到 ANSYS 的仿真计算，若不满足要求，则直接跳过 ANSYS 的计算由优化组件继续推荐新的一组优化方案进行迭代，最终可以直接获得仿真计算的优化方案结果和 CATIA 数模。

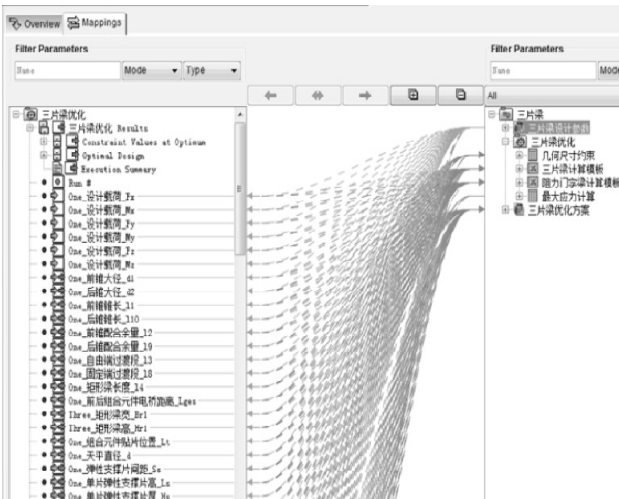


图 8 Calculator 组件与 Optimization 组件参数映射

### 2.4 设计平台的主要功能

设计平台基于 Isight 进行二次开发，运行模式采用 B/S 架构。其系统组成包括以下功能：

1) 软件平台界面搭建。实现仿真优化标准流程的封装,支持多用户登陆访问服务器。

① 融合于企业知识门户系统 (enterprise knowledge portal, EKP)，直接使用 EKP 系统的用户密码登陆及对应的管理；

② 具备定时储存功能，能够在中断点继续优化计算。

2) 参数化天平结构。

① 基于 ANSYS 预建立全参数化驱动的常规天平结构几何模型；

② 完成优化设计过程之后，输出 CATIA 格式的全参数化结构数模。

3) ANSYS 前处理技术。

① 通过 ANSYS 的 APDL 语言自动生成天平结构有限元模型；

② 天平结构材料、载荷和边界条件自动施加，网格单元尺寸可以自定义。

4) 多目标优化。通过 ParetoExplorer 多目标等多种优化算法集获得多目标折中解集。

5) 稳态热分析及多物理场耦合分析。选取温度梯度效应最小的热结构形式。

6) 优化结果后处理。从结果云图中提取具体数值，按照模板自动生成报告(见图 9)。

#### 2) 仿真验证结果

平均应变	优化方案	最大应变	优化方案	设计载荷工况	优化方案	对X干扰(%)	优化方案
X贴片处平均应变	192.652	X贴片处最大应变	203.239	X元应力	116.717	Y对X干扰(%)	0.849
Y贴片处平均应变	630.479	Y贴片处最大应变	709.818	支撑片根部应力	418.101		
Z贴片处平均应变	191.367	Z贴片处最大应变	199.314	最大应力	1010.469		
Mx贴片处平均应变	226.633	Mx贴片处最大应变	233.736	最大位移	0.846		
My贴片处平均应变	588.232	My贴片处最大应变	603.123				
Mz贴片处平均应变	540.912	Mz贴片处最大应变	625.428				

#### 3、结果云图

##### 3.1 阻力 (Fx) 分量X向微应变

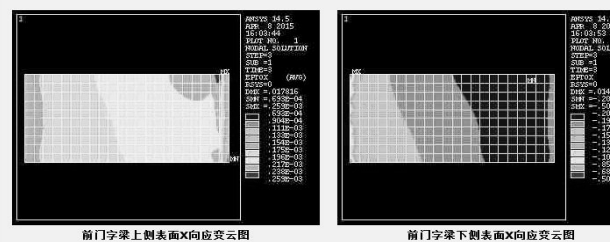


图 9 优化设计结果报告

设计平台将所有软件通过二次开发的形式关联起来，从而将繁琐的流程固化下来，从入口保证了天平设计的质量下限。另外，自动化的过程封装也大大提升了设计效率，将设计平台作为一种设计工具存在，避免了设计人员重复的调整过程<sup>[9]</sup>。

## 3 平台应用情况分析

### 3.1 设计质量提升

笔者使用设计平台对标研制了 1 台全新天平

B, 其设计载荷与现有的主力天平 A 一致见表 2。

表 2 天平设计载荷

分量	$Y/N$	$M_z/$ ( $N \cdot m$ )	$X/N$	$M_x/$ ( $N \cdot m$ )	$Z/N$	$M_y/$ ( $N \cdot m$ )
载荷	15 000	1 300	1 400	600	6 000	700

设计完成后, 将 2 台天平进行比对, 其中最重要的优化设计目标即各分量对阻力元  $X$  的干扰。2 台天平的优化结果对比如表 3 所示。

表 3 其他分量对阻力的干扰量 ( $\times 10^{-6}$ )

分量	$Y$	$M_z$	$X$	$M_x$	$Z$	$M_y$
现有天平 A	-25.3	-1	198	2	-1.0	3
全新天平 B	-1.2	0.5	259	0	13.1	0

从结果来看, 新研制天平 B 在强度相当、刚度略有提高的情况下, 各分量的灵敏度大幅提高, 有助于提高天平的精度, 同时各分量对阻力元干扰控制在 5% 以内, 升力对阻力的干扰较对标天平 A 的 25.3% 大幅降低为 1.2%。纵向干扰控制在 2% 以内, 主要通过粘贴位置精确控制来减小干扰。横向侧力对阻力干扰无法通过桥路抵消, 达到 5.1%, 但其在  $Z=6\ 000\ N$  时, 阻力元贴片处应变小于  $15\ \mu\epsilon$ , 可通过校准降低其对不确定度的影响。俯仰力矩、滚转力矩和偏航力矩在满载荷条件下, 阻力贴片处产生的应变较大, 但可以通过组桥抵消, 不产生明显的干扰输出。

从最终的优化结果上看, 设计的天平在设计平台上进行了完整的设计流程, 结果均符合设计要求。在各自设置的优化目标下, 找到了最优解, 从最终的校准数据来看, 其中升力  $Y$  对阻力  $X$  的干扰均在 1% 左右。较对照天平得到 10 倍以上的提升, 其余刚度和  $X$  元根应力等也得到了改善。这样的结果在以往的人工优化很难达到。通过新天平的校准, 干扰量得到验证, 同时最终整体天平的不确定度优于 0.1%, 达到国军标的先进指标。

### 3.2 设计效率提升

在设计平台中, 所有设计优化流程均已完整地封装好, 设计人员只需将设计参数、优化目标通过网页的形式填写完成后, 即可提交给远程服务器进行 24 h 不间断优化计算。同时服务器的计算仿真能力是个人计算机的 10 倍, 在节约计算时间的同时, 也可以将网格划分得更为细小, 最后的计算结果也更为真实可信。

以典型常规结构的杆式天平 B 为例, 按照设计平台内置的设计流程: 首先通过 EXCEL 优化方法,

从 7 种五分量结构优化出矩形梁和两片梁, 然后从 3 种阻力元件中优化出 T 型梁、门字梁元件; 再将优化数据导入 ANSYS 优化流程进行详细优化, 并对沟槽的结构和尺寸进行优化, 得到最终的优化方案为两片梁+门字梁+直槽的结构组合。表 4 对天平整个设计过程的时间消耗进行了统计, 共提交了 15 个有效的计算任务, 其中: EXCEL 优化任务为 6 个, 共耗费时间 18.4 h; ANSYS 优化任务为 9 个, 共耗费时间 260.8 h。从表 5 中可以看出: 优化总时间约为 15 d, 人工时长 (主要进行参数设置和结果分析对比工作) 占总优化时长不到 15%, 节约了设计时间。(表 4 中按照人工 8 h/d, 优化服务器 24 h/d 折算。)

表 4 天平优化过程时间消耗

序号	日期/d	任务类别	人工时长/h	服务器计算时长/h	主要工作内容
1	2—3	EXCEL	0.5	0.28	EXCEL 进行对比验证, 结果正确
2	2—5	EXCEL	0.5	0.58	增加优化时间后, 得到了有效的最优解, 系统测试完成。
3	2—5	EXCEL	1.0	2.73	初步优化
4	2—5	EXCEL	0.5	2.73	改变约束条件继续优化
5	2—6	EXCEL	1.0	4.33	改变策略, 优化所有五分量结构
6	2—15	EXCEL	1.0	3.25	阻力元优化
7	3—9	ANSYS	5.0	21.6	ANSYS 对比验证, 计算结果正确
8	3—12	ANSYS	3.0	21.6	五分量结构优化
9	3—13	ANSYS	3.0	43.2	阻力沟槽结构优化
10	3—13	ANSYS	3.0	21.6	干扰优化 (2 个任务并行优化)
11	3—13	ANSYS	1.0	21.6	微调参数, 得到较好结果
12	3—17	ANSYS	2.0	21.6	优化支撑片数量和尺寸
13	3—30	ANSYS	4.0	43.2	改变约束条件继续优化
14	4—2	ANSYS	5.0	10.8	阻力干扰优化 (2 个任务并行优化)
15	4—7	ANSYS	8.0	21.6	综合优化与验算
合计时间			38.5	240.7	人工占总时长 13.8%, 服务器占总时长 86.2%。
合计/d			4.8	10.0	共计 14.8

目前, 服务器已实现最多 4 人同时在线设计优化, 可 24 h 运行计算任务, 累计完成设计优化计算任务 200 余次, 成功设计优化 11 台天平, 包括 9 台杆式天平、1 台环式天平和 1 台盒式天平, 并完成天平有限元验证计算约 10 台次。平均每项设计优化时间从 30 d 减少到 15 d, 并且天平的设计刚度最高提高 30%, 干扰降低 20% 以上。

### 4 结论

笔者设计的平台能提升天平的自动化水平。该平台实现了基于 Web 服务的天平设计模式,从根本上提高了软件使用的方便性,能充分利用银河大型服务器的强大计算能力,划分出比以前更细更高的网格,在几百上千个方案中寻求最优方案,最终提升天平设计质量和效率。

### 参考文献:

[1] 张海天. 杆式应变天平优化设计方法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

[2] LINDELL M. Finite Element Analysis of a NASA National Transonic Facility Wind Tunnel Balance[A]. NASA/CP-1999-209101/ PT2, 1999: 595-606.

[3] 解亚军, 叶正寅, 杨中艳. 盒式应变天平优化设计与有限元分析[M]. 北京: 机械科学与技术出版社, 2011(12):

1974-1976.

[4] 向光伟, 王杰, 史玉杰, 等. 基于 iSIGHT 优化风洞应变天平设计方法研究[J]. 实验流体力学, 2015, 29(5): 45-49, 59.

[5] 王博文, 秦建华, 黄叙辉, 等. 风洞流场控制系统规范化研究与应用[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 33-37.

[6] 中国人民解放军总装备部. GJB2244A—2011 风洞应变天平规范[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2011.

[7] 吴坤安, 严宣辉, 陈振兴. 一种基于 Pareto 排序的混合多目标进化算法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(1): 62-68.

[8] 谢涛. 多目标优化与决策问题的演化算法[J]. 中国工程科学, 2002, 13(2): 80-91.

[9] 田正波, 杨家军, 史玉杰. 一种新的风洞试验支撑机构横向弹性角校准方法[J]. 兵器装备工程学报, 2017(8):32-35.

\*\*\*\*\*

(上接第 43 页)

### 参考文献:

[1] ASD/AIA S1000D. International specification for technical publications utilizing a common source database[Z]. Issue4.1. America: ASD-AIA, 2009.

[2] ASD/AIA S2000M. International specification for material management[Z]. Issue6.0. America: ASD-AIA, 2015.

[3] ASD/AIA S3000L. International procedure specification for logistics support analysis[Z]. Issue1.1. America: ASD-AIA, 2014.

[4] ASD/AIA S4000P. International specification for developing and continuously improving preventive maintenance[Z]. America: Issue1.0. ASD-AIA, 2014.

[5] ASD/AIA S5000F. International specification for in-service data feedback[M]. Issue1.0. America: ASD-AIA, 2016.

[6] MIKOLOV T, CHEN K, CORRADO G, et al. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space[Z]. Computer Science, 2013.

[7] MIKOLOV T, SUTSKEVER I, CHEN K, et al. Distributed representations of words and phrases and their compositionality[C]//International Conference on Neural Information Processing Systems. America: Curran Associates Inc., 2013: 3111-3119.

[8] 任郭珉. 基于文本挖掘的药用植物数据库的建立及网络药理学分析[D]. 北京: 北京协和医学院中国医学科学院; 北京协和医学院; 清华大学医学部; 中国医学科学院, 2014.

[11] 王文琪, 胡炎, 赵娜, 等. 基于距离权重向量优化模型的虚端子自动连接方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 346-352.

[12] 王道翔, 杜庆治, 赵继东, 等. 基于词信息量加权的地理 POI 数据融合新方法研究[J]. 软件导刊, 2018(3): 41-44, 49.

[13] 李光军. 女子赛艇训练数据挖掘研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.

[14] 任高山. 基于微信公众平台的文本情感分析研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.

[15] 王峰, 林丽珊, 刘毅. 基于群组平台知识圈的精准信息推荐[J]. 现代情报, 2018(7): 74-80.

[16] 于凤, 郑雨晴, 郑德权, 等. 面向选择类题型求解的相似问题发现研究[J]. 计算机工程与应用, 2018(15): 120-125.

[17] LE Q V, MIKOLOV T. Distributed Representations of Sentences and Documents[J]. Computer Science, 2014, 4: II-1188.