机车车体钢结构减重优化设计方法研究

隆孝军，杨毓康，王毅，唐念，江太宏，李静
（南车资阳机车有限公司 研发部，四川 资阳 641301）

摘要：从设计与仿真计算层面，对机车车体钢结构优化减重设计问题进行分析。通过对 ANSYS 的 APDL 语言编程控制与二次开发，在满足强度和刚度条件的前提下，以车体各主要部件的钢板厚度为设计变量，以车体结构的重量为目标，实现减重优化程序模块化和主要板厚参数自动优化功能，有效地解决了传统减重设计的诸多问题。该方法在多项机车设计上得到运用和验证，减重幅度和效率提升方面均取得了很好的效果，对所有机车车体结构减重具有普遍的参考意义。

关键词：车体 APDL 程序 优化减重

1 前言

随着近年来公司国外机车订单的增加，产品开发中引用了较多欧洲及 UIC 国际标准，这些标准提出了较高的设计验证要求，对机车的重量控制带来新的挑战。而车体作为机车承载结构，其钢结构重量也是控制的主要对象。同业内，针对此类问题，工程技术人员从多种角度利用仿真分析和优化设计技术实现轻量化。例如，刘建新根据机车车体在各种工况下受到的载荷，从结构形式的角度研究了车体减重的途径[1]。李文勇则利用 ANSYS 软件对现代有轨电车的车体钢结构进行优化设计，整车重量减重 3t[2]。石莹等利用遗传算法建立了一种研究结构拓扑优化的方案，并运用于车体钢结构的的优化设计[3]。沈安林等运用组合应变能指标函数将静态多工况刚度问题和动态工况振动频率问题统一，通过对车体结构实现多目标拓扑优化，得到较为清晰的承载结构[4]。徐超等则提出了一种适用于复杂车体结构优化设计的优化策略，并通过灵敏度分析、阶段优化及应力集中处理等措施进行了优化过程控制，提高结构轻量化优化设计的可行性及优化效率[5]。

机车车体传统的减重方法主要有两种，一是根据设计师经验人为减少板厚，因没有试验和计算支撑，而又需要保证车体安全可靠性，因此一般安全系数余度较大，如 DF12/DF8B/DF4B，重量就存在较大余量。二是通过设计师减重（该减重方法比前一种减重幅度大），试制前通过仿真计算校验减重方案的可行性，如不可行，设计改进，再次进行仿真计算，经过反复修正，直到减重方案强度和刚度指标满足要求。设计减重不理想，反复修正时间会很长，减重的系统匹配存在设计盲区。

上述两种方法预知性疲劳强度考虑差，减重效率低，减重幅度有限，存在重大返工的风险，加上现在设计周期要求越来越短，设计的精准度要求越来越高，传统的减重方法已不能满足实际需求。

为满足车体结构减重设计要求，本文从 ANSYS 分析软件及车体钢结构减重角度考虑，对 ANSYS 的 APDL 语言编程控制与二次开发，在满足强度和刚度条件前提下，以车体各主要部件的钢板厚度为设计变量，以车体结构的重量为目标，实现减重优化程序模块化和主要板厚参数自动优化功能。

收稿日期:2016 年 6 月 14 日
隆孝军，(1978—)，男，汉族，四川内江人，高级工程师，从事仿真设计工作。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

2 车体优化减重模块化思路

2.1 结构优化原理

车体结构为机车主要承载结构，其数学模型较复杂，可通过目标函数和约束条件的显函数表达式建立数学模型，通过曲线拟合的方法建立目标函数和约束条件的近似函数关系。即：

$$H = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} b_{i,j} x_i x_j \quad (1)$$

式中：a_0——常数；a_i，a_{ij}——方程目标函数和约束条件的系数；其中系数 a_i 和 a_{ij} 通过加权最小二乘法误差来确定，即：

$$E^2 = \sum_{j=1}^{n_d} W^{(j)} (h^{(j)} - H^{(j)})^2 \quad (2)$$

式中：n_d——设计变量的组数；$W^{(j)}$——与第 j 组设计变量有关的权重；$h^{(j)}$——第 j 组组设计变量对应的 h 值；$H^{(j)}$——第 j 组组设计变量对应的 H 值；根据最小二乘法，求 E^2 的极小值：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S}{\partial a_i} = 0 \\ \dfrac{\partial S}{\partial b_{i,j}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

通过求解式（3）得出系数 a_i 和 b_{ij}，并由此得到目标函数和约束条件的拟合曲面方程。然后通过 ANSYS 提供的有限元优化方法，便可得出目标函数的最优值。

2.2 机车车体优化仿真方法模板

通过 APDL 语言把车体优化流程编程封装，实现自动优化计算控制模块。通过该方法，对车体主梁厚度和高度进行参数控制，对整体车体最大应力和车体边梁最大挠度选取进行流程模块化，对整车应力、变形设计技术要求设置模块化，对整车优化过程控制程序化和模块化。在机车优化仿真计算过程中，通过“车体优化计算主程序控制模块”，调整该模块中部分参数数据，即可进行减重优化，大幅度减少减重的工作量，提高优化幅度，减少操作错误率。

2.3 优化设计模块使用流程和要求

优化设计模块使用的方法如图 1 所示。

车体优化设计模板使用要求：

（1）模板中板厚参数的命名及数量不唯一固定的，但是命名必须符合 APDL 参数命名规则：(a) 以字母开头；(b) 只能包括字母、数值和下划线；(c) 不超过 32 个字符。

（2）计量单位在整个计算过程统一。

（3）轻量化计算前，须预定义计算工况。

（4）指定板厚变化范围时考虑工程实际。

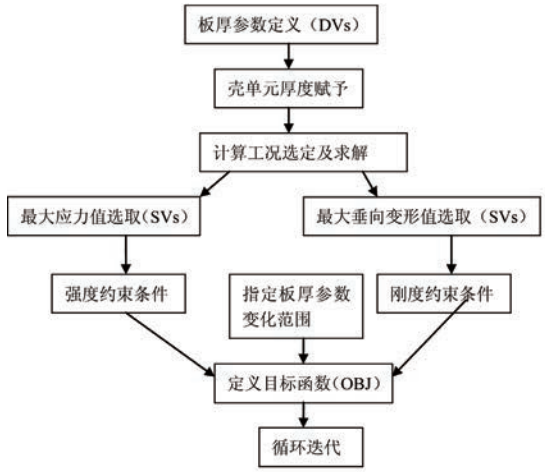
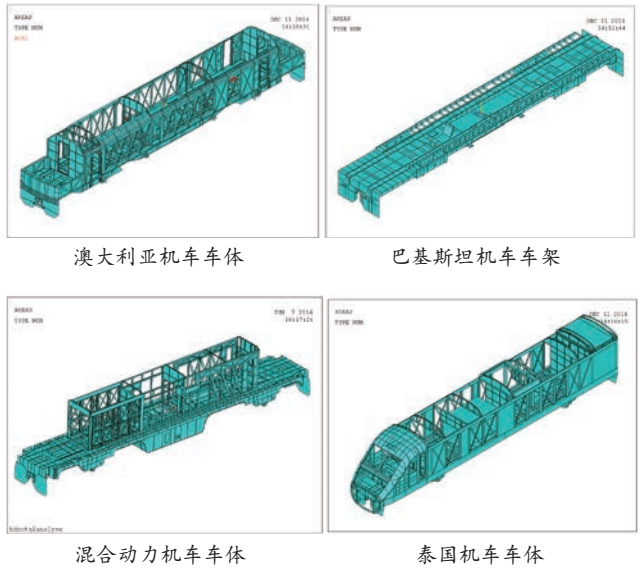


图 1 优化模块使用流程

3 应用效果验证

该车体结构仿真减重优化设计方法在澳大利亚机车、巴基斯坦轻车、混合动力机车和泰国机车设计上实际得到了应用，如图 2 所示。验证表明，新的优化减重设计方法相对传统减重方法计算效率提高 10% 以上，减重幅度增加了 3% 左右。



澳大利亚机车车体　　巴基斯坦机车车架

混合动力机车车体　　泰国机车车体

图 2 应用仿真减重优化设计方法的项目

4 结论

通过 ANSYS 的 APDL 语言编程控制与二次开发，实现了减重优化程序模块化、主要板厚参数化，有效地解决了传统减重设计的诸多问题。该设计方法提高了优化的计算效率与减重幅度，节省了设计成本，该方法在多项机车设计上得到运用和验证，减重幅度和效率提升方面均取得了很好的效果，对所有机车车体结构减重具有普遍的参考价值。

APDL 优化程序模块化方法对不同车型具有通用性，简化繁琐的人工载荷处理、模型修正和数据统计工作，提高设计效率。在满足机车车体强度和刚度指标的前提下，提高减重优化幅度。

参考文献

[1] 刘建新 . 机车车体结构的减重途径 [J]. 机车电传动，1996，（5）：32-34.

[2] 李文勇 . DL6W 型现代有轨电车车体钢结构减重优化 [J]. 内燃机车，2005，（11）：:12-14.

[3] 石莹，姚玉鹏，佟维 . 基于遗传算法的车体钢结构拓扑优化设计 [J]. 大连交通大学学报，2008,29（1）：37-41.

[4] 沈安林，肖守讷 . 车体结构多目标拓扑优化设计探讨 [J]. 铁道机车车辆，2011,31（3）：5-7.

[5] 徐超，赵洪伦，刘凯杰 . 车体轻量化结构优化设计策略及其实施 [J]. 铁道车辆，2013,51（4）：18-20.

附：车体优化计算主程序控制模块

```
！定义设计变量，即各钢板厚度，模板中此处单位为 mm
bl_jb_1=6
bl_ncwb_1=8
bl_wclb_1=10
dj_fd_1=6
dj_zl_1=8
PARSAV,SCALAR,'yyk','txt',' '
/prep7
！指定要分析的模型及模型位置，其中 hyjc1218_5 为模型名字，Y:\huoyun\youhua\ 为模型位置路径
RESUME,'hyjc1218_5','db','Y:\huoyun\youhua\',0,0
PARRES,NEW,'yyk','txt',' '
allsel,all
！模型尺寸为 m
bl_jb_1=bl_jb_1/1000
bl_ncwb_1=bl_ncwb_1/1000
bl_wclb_1=bl_wclb_1/1000
dj_fd_1=dj_fd_1/1000
dj_zl_1=dj_zl_1/1000
！定义板厚实常数
R,200,bl_jb_1,0,0,0,0,0,
R,201,bl_ncwb_1,0,0,0,0,0,
R,202,bl_wclb_1,0,0,0,0,0,
R,203,dj_fd_1,0,0,0,0,0,
R,204,dj_zl_1,0,0,0,0,0,
！赋予壳单元厚度
CMSEL,S,bl_jb
ALLSEL,BELOW,AREA
EMODIF,all,REAL,200,
CMSEL,S,bl_ncwb
ALLSEL,BELOW,AREA
EMODIF,all,REAL,201,
CMSEL,S,bl_wclb
ALLSEL,BELOW,AREA
EMODIF,all,REAL,202,
CMSEL,S,dj_fd
ALLSEL,BELOW,AREA
EMODIF,all,REAL,203,
CMSEL,S,dj_zl
ALLSEL,BELOW,AREA
EMODIF,all,REAL,204,
！设计变量转换为 mm
bl_jb_1=bl_jb_1*1000
bl_ncwb_1=bl_ncwb_1*1000
bl_wclb_1=bl_wclb_1*1000
dj_fd_1=dj_fd_1*1000
dj_zl_1=dj_zl_1*1000
allsel,all
！计算工况 1~3
```


投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

```
/GRAPHICS,FULL
FINISH
/SOL
LSSOLVE,1,3,1,
finish
！分别选取 3 个工况下的最大应力值
/post1
SET,FIRST
SHELL,TOP
ALLSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,AREA
NSORT,S,EQV,0,0，,0
*GET,s11,SORT,,MAX
SHELL,BOT
NSORT,S,EQV,0,0，,0
*GET,s12,SORT,,MAX
s1=max(s11,s12)
SET,NEXT
ALLSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,AREA
SHELL,TOP
NSORT,S,EQV,0,0，,0
*GET,s21,SORT,,MAX
SHELL,BOT
NSORT,S,EQV,0,0，,0
*GET,s22,SORT,,MAX
s2=max(s21,s22)
SET,NEXT
ALLSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,AREA
SHELL,TOP
NSORT,S,EQV,0,0，,0
*GET,s31,SORT,,MAX
SHELL,BOT
NSORT,S,EQV,0,0，,0
*GET,s32,SORT,,MAX
s3=max(s31,s32)
allsel,all
！选取工况 1 最大垂向变形值，模型中节点号 19667、60410、137214 等根据模型具体情况确定
SET,FIRST
*GET,ny1,NODE,19667,U,Y
*GET,ny2,NODE,60410,U,Y
*GET,ny3,NODE,137214,U,Y
*GET,ny4,NODE,168361,U,Y
*GET,ny_z,NODE,116019,U,Y
dy=(ny1+ny2+ny3+ny4)/4-ny_z
！计算模型质量
ALLSEL,BELOW,AREA
ETABLE,vol,VOLU,
SSUM
*GET,totalv,SSUM，,ITEM,VOL
mass=totalv*7850
/OPT
！形成优化程序 kk1
OPANL,'kk1','txt',' '
！板厚变化范围
OPVAR,bl_jb_1,DV,4,8，,
OPVAR,bl_ncwb_1,DV,5,10，,
OPVAR,bl_wclb_1,DV,8,12，,
OPVAR,dj_fd_1,DV,4,8，,
OPVAR,dj_zl_1,DV,5,10，,
！强度约束条件，模板中第 1 工况 170MPa，第 2 工况 340MPa，第 3 工况 230MPa
OPVAR,S1,SV，,170000000，,
OPVAR,S2,SV，,340000000，,
OPVAR,S3,SV，,230000000，,
！刚度约束条件，模板中最大垂向变形不超过 0.006
OPVAR,DY,SV，,0.006，,
！目标函数为质量最小
OPVAR,MASS,OBJ，，，，
OPTYPE,SUBP
OPSUBP,30,,
OPEQN,0,0,0,0,0,
OPEXE
```