

基于随机有限元的车辆结构可靠度分析研究

王社锋, 赵洪伦

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 提出了一种运用可靠度理论中的改进一次二阶矩法和有限元分析相结合的方法, 并以转向架结构为对象, 对构架侧梁关注部位进行了可靠度分析. 分析考虑了结构、材料及外载荷的随机离散性, 给出了结构的可靠度指标, 同时通过各随机变量的灵敏度分析, 给出了它们对结构设计与制造可靠性的影响程度.

关键词: 结构可靠度; 一次二阶矩法; 有限元法; 转向架构架; 灵敏度

中图分类号: U 260

文献标识码: A

Reliability Analysis of Railway Vehicle Structure Based on Stochastic Finite Element

WANG Shefeng, ZHAO Honglun

(Railway and Mass Transportation Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A method is put forward which combines the modified first order second moment method (MFOSM) of reliability theory and finite element method in the research. Based on a case study of the bogie framework, the reliability of the concerned part of the side beam is analyzed. The stochastic properties of materials, geometry and loads are considered in this study. The reliability index is obtained by iterating calculation. Further, the sensitivity indexes of reliability index with respect to the random variables are analyzed and the extent of the impact to structure design and manufacture reliability can be obtained.

Key words: structure reliability; modified first order second moment method; finite element method; bogie framework; sensitivity

由于实际结构与强度相关参数的分散性, 传统的确定性强度设计分析方法已难以适应日益发展的高

速及重载对轨道车辆结构的强度可靠性和安全性越来越高的要求, 因而应用可靠性技术对重要机械结构进行可靠度分析受到普遍关注^[1]. 在求解复杂结构可靠度方法方面, 可靠度理论和有限元法结合是当前结构可靠性研究的热点, 有限元技术和可靠度分析的联合, 就是所谓的随机有限元或概率有限元. 在可靠度研究中, 随机有限元分析的目的就是使用可靠度设计方法计算功能函数 <0 的概率(即失效概率), 而功能函数隐式定义为一个有限元问题的解^[2].

可靠度理论中改进的一次二阶矩法(验算点法)已经在工程中获得较多应用. 该方法用一个与结构可靠度有精确或近似关系的可靠度指标来描述结构的可靠性. 通常实际结构都很复杂, 功能函数多是隐式函数, 必须通过数值解法迭代进行计算, 在本质上是搜索验算点的优化过程, 其方法也是研究中要关注的问题之一^[3-5].

本文结合可靠度理论中的验算点法和有限元法, 为避免直接计算功能函数的梯度带来的困难, 利用数值差分法来代替梯度计算的解析式, 通过编程, 以某转向架构架为例进行了可靠度分析.

1 改进的一次二阶矩法计算

改进的一次二阶矩法又称验算点法, 其计算结构可靠度的原理在文献[6]中已有详细论述, 在此不再赘述. 设结构的功能函数为 $G = G(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为随机变量, 且各随机变量相互独立, 则验算点法的计算步骤如下:

(1) 给可靠度指标 β 及各随机变量赋初值 $x_i^* (i = 1, 2, \dots, n)$, 一般取各随机变量的数学期望;

(2) 利用 JC 法^[6]将非正态随机变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 在 x_i^* 等效正态随机变量, 设等效后 x_i 的均值为 μ_i , 标准差为 σ_i ;

收稿日期: 2009-07-14

作者简介: 王社锋(1981—), 男, 博士生, 主要研究方向为轨道车辆结构可靠性设计分析与优化. E-mail: wangshefeng@yeah.net
赵洪伦(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为轨道车辆现代设计方法. E-mail: zhaohonglun@263.net

(3) 计算 $(\partial G / \partial x_i)_{x^*}$;

(4) 计算灵敏系数 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$

$$\lambda_i = \sigma_i \frac{\partial G}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \cdot \left(\sum_i^n \left(\sigma_i \frac{\partial G}{\partial x_i} \Big|_{x^*} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (1)$$

(5) 计算新的验算点 $x_i^* (i=1, 2, \dots, n)$

$$x_i^* = \mu_i - \beta \lambda_i \sigma_{x_i} \quad (2)$$

(6) 计算新的可靠度指标

$$\beta = \frac{G(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_i^n (\mu_i - x_i^*) \frac{\partial G}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*}}{\sum_i^n \lambda_i \sigma_i \frac{\partial G}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*}} \quad (3)$$

(7) 将所得的 $x_i^* (i=1, 2, \dots, n)$ 的值代入原功能函数 $G = G(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 计算 G 的值;

(8) 检验极限状态方程 $G = G(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0$ 的条件是否满足, 如果不满足, 则计算前后 2 次 β 和 G 的各自差值的比值 $\Delta\beta/\Delta G$, 并由

$$\beta_{m+1} = \beta_m - G_m \Delta\beta/\Delta G \quad (4)$$

估算一个新的 β 值, 然后重复步骤(2)~(8), 直到满足 $G = G(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \approx 0$ 为止;

(9) 计算可靠度

$$P_r = \Phi(\beta) \quad (5)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 是标准正态分布函数。

2 改进一次二阶矩法与有限元法结合计算结构可靠度

结构危险点的广义应力 S (应力、应变、位移等) 可看作弹性模量、泊松比、尺寸和载荷等的随机变量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的隐式函数, 即

$$S = S(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

结构广义强度 R (许用应力、许用位移、许用应变等) 通常是显式的。则结构的功能函数 G 可用 S 和 R 表示, 即

$$G = G(S, R) \quad (7)$$

设已知各随机变量的分布形式, 即可根据验算点迭代法进行求解, 其中功能函数 G 在验算点 $x_i^* (i=1, 2, \dots, n)$ 的偏导数由向前差分法^[7-8]计算, 即

$$\frac{\partial G}{\partial x_i} \Big|_{x^*} = \frac{\partial G}{\partial S} \Big|_{S(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \cdot \frac{\partial S}{\partial x_i} \Big|_{x_i^*} \approx \frac{S(x_1^*, \dots, x_i^* + \sigma_{x_i}, \dots, x_n^*) - S(x_1^*, \dots, x_i^*, \dots, x_n^*)}{\sigma_{x_i}}$$

$$\frac{\partial G}{\partial S} \Big|_{S(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)}$$

式中, σ_{x_i} 是第 i 个随机变量在迭代点正态化后等效的标准差。由于包含 n 个影响广义应力响应的随机有限元变量, 故进行一次迭代需要进行 $n+1$ 次确定性有限元计算。可以看出, 分析过程需要将确定性有限元当作子程序调用, 相当于调用一个黑箱的有限元程序, 从而大大减轻编程的负担。本文通过 Fortran 编制验算点法程序, 调用 MSC. Nastran 进行偏导数计算, 可靠度算法和有限元联合求解结构可靠度的流程见图 1。

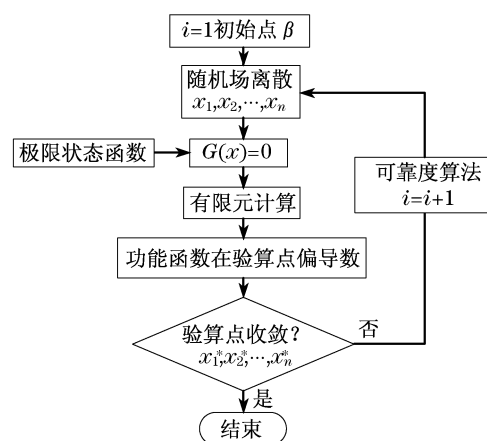


图 1 可靠度和有限元分析联合解算流程

Fig.1 Joint solution process of reliability and finite element analysis

3 构架侧梁结构可靠度分析算例

3.1 计算模型及载荷工况

转向架构架为整体焊接结构, 主要由 2 个侧梁和 2 个横梁组成。侧梁整体呈 U 型, 为封闭的箱形结构, 在其端部下侧设置轴箱橡胶弹簧安装座, 中央上部设置空气弹簧座。构架的横梁也采用封闭的箱形结构, 在其外侧斜对称设置电机和齿轮箱吊座, 在其下部斜对称设置牵引止档, 在 2 个横梁之间设置横向止档座。构架结构的有限元模型如图 2 所示。

在有限元计算中, 模型采用弹性边界元进行约束, 垂向边界元施加在空气弹簧座部位, 横向边界元施加在一侧横向止档座, 弹性边界元的刚度按照悬挂元件的参数在实际受力部位多点施加。本次分析模拟车辆在直线上行驶, 只考虑垂向载荷, 载荷及约束情况见图 3。由于单独考虑垂直载荷下结构的可靠度, 并且在有限元分析得知构架的大应力部位都集中在构架侧梁上, 其中最大应力产生在侧梁上盖板

弯折处,其他的大应力部位还有侧梁下盖板与轴箱弹簧座连接处、侧梁下盖板中心孔处. 为了分析方便,提高计算效率,仅取一侧侧梁进行结构可靠度分析,整个侧梁模型节点数 4 151 个,四边形板壳单元 4 054 个,三角形板壳单元 252 个. 载荷 P_1 按照 TB1335—1996《铁道车辆强度设计与试验鉴定规范》确定,计算得: $P_1 = 87\,427\text{ N}$.



图 2 转向架构架有限元模型

Fig.2 Finite element model of bogie framework

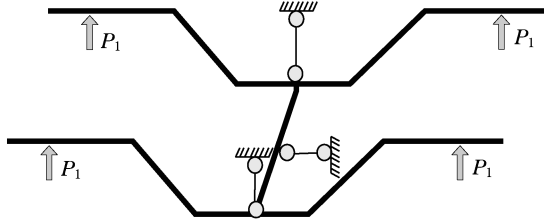


图 3 工况受力及约束情况示意图

Fig.3 Case of forces and constraints

3.2 结构强度薄弱部位的确定

结构强度薄弱部位是运用中可能发生结构安全问题之处. 一般来说,可以通过试验、有限元分析或参考运用维修记录获取,这里采用有限元分析法. 应力分析结果表明,最大应力部位发生在上盖板弯折处,最大 von_Mises 应力 174 MPa. 但考虑到由于结构、载荷及所用材料参数的随机性,由静强度有限元分析出结构的最危险点并不一定是结构可靠度最低的部位,必须综合判断,对结构所有可

能的危险部位进行可靠性分析,通过对比确定结构的可靠度.

3.3 结构可靠度分析

这里仅给出静强度计算得出的结构最危险点的可靠度分析过程. 定义板元的极限状态方程为单元的 von_Mises 应力达到其抗力,即极限状态方程为

$$g(X) = R(X) - S(X) = \sigma_1 - \sigma_v = 0 \quad (9)$$

式中: σ_1 为材料的屈服极限,是抗力项; σ_v 为单元的 von_Mises 应力.

分析考虑的随机变量有 7 个: 材料密度 A_1 , 载荷 A_2 , 构架侧梁上下盖板厚度 A_3 , 侧板厚度 A_4 , 中间隔板厚度 A_5 , 内部支撑圆管厚度 A_6 , 材料屈服强度 A_7 . 具体参数见表 1.

表 1 构架侧梁模型随机参数

Tab.1 Random parameters of framework side beam model

随机变量	均值	变异系数	概率分布类型
A_1	$7.8 \times 10^{-9} \text{ t} \cdot \text{mm}^{-3}$	0.10	正态分布
A_2	87 427 N	0.20	正态分布
A_3	12 mm	0.05	正态分布
A_4	10 mm	0.05	正态分布
A_5	8 mm	0.05	正态分布
A_6	20 mm	0.05	正态分布
A_7	235 MPa	0.05	对数正态分布

对于材料弹性模量的变异性,文献[9]指出在零位移边界条件下,弹性模量的变异性对应力计算结果无影响,在上述边界条件下,对 2 组弹性模量进行了对比. 取弹性模量 $E_1 = 180 \text{ GPa}$, 和 $E_2 = 250 \text{ GPa}$, 进行有限元分析对比,使用软件 MSC. NASTRAN 进行应力计算. 结果表明两者的差别可以忽略,所以这里弹性模量的变异性未予考虑.

迭代的计算过程及结果见表 2,迭代 6 次满足设定的要求,其中调用有限元分析 49 次.

表 2 迭代计算过程

Tab.2 Process of iterating calculation

迭代次数	可靠指标 β	功能函数 G	$A_1/10^{-9}$	$A_2/10^5$	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
迭代初值	4.000 0		7.800 0	0.874 3	12.000 0	10.000 0	8.000 0	20.000 0	216.000 0
1	4.860 0	84.451 3	6.486 2	0.761 6	10.840 9	9.114 5	7.323 4	18.319 3	211.254 5
2	3.028 1	5.567 4	7.804 2	1.333 0	11.649 9	9.896 3	7.995 2	20.013 5	206.086 5
3	3.046 8	0.212 13	7.780 4	1.336 2	11.389 6	9.809 4	7.976 4	19.983 5	205.325 9
4	3.046 1	$-2.259\,8 \times 10^{-2}$	7.792 6	1.339 6	11.390 1	9.813 2	7.982 3	19.998 9	205.609 6
5	3.046 3	$6.973\,3 \times 10^{-3}$	7.792 6	1.339 3	11.389 0	9.812 9	7.982 3	19.998 9	205.588 3
6	3.046 3	$-3.967\,3 \times 10^{-4}$	7.792 6	1.339 3	11.389 1	9.812 9	7.982 3	19.998 9	205.589 2

灵敏度分析对评估结构参数对安全可靠性的影响程度及结构设计改进的有效性有很大的帮助. 它提供了各随机变量或其参数之间重要性程度的相对比较值. 经过对构架侧梁各随机变量灵敏度分析, 各随机变量对可靠度指标的灵敏系数如图4所示(图示为取绝对值后结果).

灵敏度分析结果为结构设计制造中提高可靠度给出了方向. 从灵敏度图上可以看出载荷的变异性对结构可靠度影响最大, 其次为上下盖板的厚度和材料的屈服极限, 因而在结构设计时对这些参量的变异性应予以特别关注, 而在制造时, 也应对所用材料的力学性能和板厚加工精度予以严格控制.

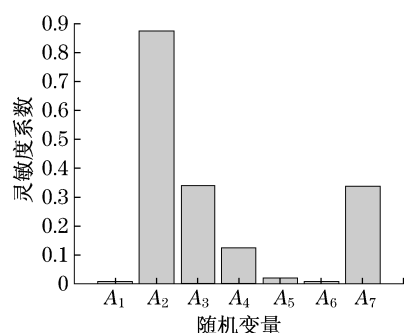


图4 随机变量可靠度指标的灵敏系数

Fig.4 Reliability index sensitivity factors of random parameters

4 结论

(1) 本文提出了可靠度方法和有限元直接结合进行结构可靠度评定的方法, 通过实例分析表明是可行的.

(2) 通过随机变量可靠度指标的灵敏度分析, 获得了各随机变量对结构强度的影响度, 其判别有助于在结构设计制造中采取措施提高结构强度的可靠性.

在应用中发现, 该方法还有待改进之处: 由于改进的一次二阶矩法是通过功能函数在验算点进行泰勒展开线性化得到的, 对实际工程中的复杂结构, 尤其是非线性较高的情况下, 即结构响应对随机参数

敏感部位, 用这种方法进行迭代计算不易收敛, 且迭代的收敛性依赖迭代初值的合理选择, 因而其算法需要改进, 再则对复杂结构有限元重分析次数多, 所用时间较长.

参考文献:

- [1] 赵永翔. 铁道车辆结构强度可靠性与安全性技术展望[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 92.
ZHAO Yongxiang. Reliability and safety technologies for the structure strength of railway of railway vehicles in the future [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(2): 92.
- [2] 秦权, 林道锦, 梅刚. 结构可靠度随机有限元[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
QIN Quan, LIN Daojin, MEI Gang. Reliability stochastic finite element methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [3] 贡金鑫, 仲伟秋, 赵国藩. 结构可靠度指标的通用计算方法[J]. 计算力学学报, 2003, 20(1): 12.
GONG Jinxin, ZHONG Weiqiu, ZHAO Guofan. A general approach for computing structural reliability index[J]. Chinese Journal of Computation Mechanics, 2003, 20(1): 12.
- [4] Sudret B, Der Kiureghian A. Comparison of finite element reliability methods[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17(4): 337.
- [5] Haukaas T, Der Kiureghian A. Strategies for finding the design point in non-linear finite element reliability analysis [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2006, 21(2): 133.
- [6] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
WU Qingxi. Structure reliability analysis and stochastic finite element methods[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [7] 钱云鹏, 何恩山, 陈凤意, 等. 结构可靠度的显示迭代算法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 61.
QIAN Yunpeng, HE Enshan, CHEN Fengxi, et al. Explicit iteration algorithm of structural reliability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 61.
- [8] Pellissetti M, Capiez-Lernout E, Padlwarter H, et al. Reliability analysis of a satellite structure with a parametric and a non-parametric probabilistic model [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, (198): 344.
- [9] 周张义, 李芾, 傅茂海. 材料参数对机车车辆结构有限元分析的影响研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 99.
ZHOU Zhangyi, LI Fu, FU Maohai. Research on the effect of material parameters on the finite element analysis of locomotive and vehicle structure [J]. China Railway Science, 2008, 29(2): 99.