

# 大数据条件下结构可靠性计算<sup>①</sup>

方永锋<sup>②\*</sup> 王 力<sup>\*\*</sup> 程正伟<sup>\*</sup>

(<sup>\*</sup> 贵州工程应用技术学院机械工程学院 毕节 551700)

(<sup>\*\*</sup> 贵州工程应用技术学院信息工程学院 毕节 551700)

**摘 要** 大数据在各个领域正发挥着越来越重要的作用。本文利用对于结构监测收集的大数据,首先根据数据的分布规律,对获得的大数据进行分析,对于不同类型的数据,进行了分类,由此得到结构所承受不同类型的应力响应;第二,根据多次载荷条件下的应力-强度干涉理论,综合考虑不同类型的应力响应与结构的强度,给出了结构的可靠性预测的模型;第三,给出了大数据载荷服从正态分布时的结构一次二阶距法计算可靠性指标的模型;第四,由不同类型的应力响应根据该模型计算出不同的结构可靠度,取这些可靠度中的最小值作为该结构的可靠度。最后通过一个算例验证了本文方法的可行性与有效性。

**关键词** 大数据, 结构, 可靠性, 计算

## 0 引 言

现代化的制造企业正在用激光、传感器、无线网络等捕捉大数据,这些大数据包括制造工艺的处理及温度和振动的影响、可靠性数据等,企业不断地用捕捉到的大数据通过不同的算法在计算机上进行处理之后,对产品进行改进,增加企业在市场的竞争力。大数据被广泛地运用在技术与方法的发现与发展以及决策中。文献[1]认为现代社会应该重视大数据,并对大数据的 5V (volume, velocity, variety, veracity, value) 做了描述,认为它们和新技术的意义一样重要。文献[2]分析了大数据在安全领域应用原理,建立了安全大数据应用的理论体系,并给出了安全大数据处理流程,为大数据在安全科学领域的应用提供了理论指导。文献[3]提出将大数据处理技术应用于大容量电力电子系统可靠性研究,借助这些装备的海量运行数据,利用大数据科学的最新理论成果,从数据泛在关系出发开展它们的可靠性研究。文章认为大数据在肿瘤心脏学中扮演了很

重要的角色,并说明大数据是心脏肿瘤学向前发展的一个唯一的机遇,还进一步给出了大数据在该学科中的使用方法及其算法。文献[4]用分布式算法对大数据进行了处理,给出了可行的算法。文献[5]提出了大数据在交通可靠性运行中的应用,认为大数据为交通管理与决策范式革新带来了机遇。文中对数据质量和数据特征进行了分析,给出了高速公路可靠性估计方法。文献[6]利用大数据对系统的可靠性进行了预测与分析,给出了预测模型,并和已有的方法比较,预测效果更好。对于大多数结构来说,在它的寿命期内,产生的数据是海量的,如桥梁、风电塔、汽车底盘等服役过程中,承受的不仅有海量的工作载荷,还有其他载荷,如风、腐蚀、振动等,及时地获取这些数据,并对数据进行分析、整理,对结构的可靠性进行预测,就可以为这些结构的运行提供有力的数据支持,从而提出有效的维护、保养措施。文献[7]运用大数据对已有的桥梁结构进行了评估,由大数据得出,桥梁的早期维护与保养至关重要。文献[8]利用结构检测收集的大数据对

① 贵州省财政厅、贵州省经济和信息化委员会“精准扶贫大数据平台及数据共享机制建设”项目资助,贵州省高等学校新能源汽车产学研基地(黔教科 KY[2014]238),贵州省教育厅(黔教科 KY 字[2017]304)和贵州省科学技术基金(黔科合[2018]1055)资助项目。  
② 男,1975 年生,博士,教授;研究方向:大数据分析机器算法与机械结构可靠性分析与设计;联系人,E-mail: fangyf\_9707@126.com  
(收稿日期:2018-07-02)

意大利的某大型钢筋混凝土结构提出了一种更快速的检测方法,该方法非线性,更实用可行。文献[9]利用天气与风电装备本身运行的大数据以风力涡轮机故障模型来建立维护决策制定。而利用大数据对结构进行可靠性方面的研究目前相关文献较少,在大多数情况下,大数据没有明显的分布规律,但在某些情况下,又需要利用这些大数据对结构的可靠性进行评估。因而可以对这些大数据进行分类,确定每类的分布函数,就可以用概率可靠性的方法对结构的可靠性进行分析与评价。

本文利用对于结构检测收集的大数据,根据数据搜集时的不同类型,对于大数据进行分类处理。对获得的大数据进行分析,得到结构所承受应力响应,然后根据应力响应与结构的强度,给出结构的可靠性预测的模型。最后通过一个算例说明本文方法的可行性与有效性。

## 1 结构应力大数据分析

结构在它的寿命周期内,由于承受载荷而产生的数据是海量的,首先根据载荷的数据特征对这些载荷进行分类,分别为  $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$ , 每一类  $A_i$  的载荷次数记为  $m_i$ , 这里  $i, m, n$  都是自然数。

在每一类  $A_i$  里,结构承受的一次载荷为  $S_{A_i}$ , 它的应力记为  $s_{A_i}$ 。对于这一类  $A_i$  的数据,提取最大的  $S_{\max A_i}$ , 它对应的应力为  $s_{\max A_i}$ , 如果结构在  $s_{\max A_i}$  作用下是可靠的,则结构在  $A_i$  类载荷作用下也是可靠的。由此,在结构服役期,从保守安全出发,可用每一类  $A_i$  中的  $s_{\max A_i}$  等效于  $A_i$  中的每一次作用于结构的应力,将这一类载荷中的最大载荷  $S_{\max A_i}$  重复  $m_i$  次作用于结构的可靠度作为结构在  $A_i$  类载荷下的结构可靠度。

## 2 结构大数据下可靠度计算

设  $s_{\max A_i}$  经过归纳、统计、假设检验所得的概率分布函数和概率密度函数分别为  $G_i(s_{\max A_i})$  和  $g_i(s_{\max A_i})$ 。则结构在承受  $A_i$  类随机载荷在  $m_i$  次时的等效载荷  $S_{\max A_i}$  对应的应力  $s_{\max A_i}$  的概率分布函数

为

$$F_i(s_{\max A_i}) = [G_i(s_{\max A_i})]^{m_i} \tag{1}$$

则由式(1)计算可得  $F_i(s_{\max A_i})$  的概率密度函数  $f_i(s_{\max A_i})$  如下:

$$f_i(s_{\max A_i}) = m_i [G_i(s_{\max A_i})]^{m_i-1} g_i(s_{\max A_i}) \tag{2}$$

设结构的强度随机变量  $\delta$  的概率密度函数为  $f(\delta)$  且已知,由应力-强度干涉理论,可得结构在  $A_i$  类载荷大数据作用下的可靠度计算公式为

$$\begin{aligned} p_{r_i} &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\delta) \int_{-\infty}^{\delta} f_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} d\delta \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\delta) \int_{-\infty}^{\delta} m_i [G_i(s_{\max A_i})]^{m_i-1} \cdot g_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} d\delta \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\delta) [G_i(\delta)]^{m_i} d\delta \end{aligned} \tag{3}$$

结构承受的载荷大数据  $n$  个分类  $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$  中,依据式(3)每一类都会计算得到一个对应的可靠度:

$$p_{r_1}, p_{r_2}, \dots, p_{r_i}, \dots, p_{r_n} \tag{4}$$

取式(4)中最小的可靠度即为结构在大数据载荷条件下的最终可靠度:

$$p_r = \min \{p_{r_1}, p_{r_2}, \dots, p_{r_i}, \dots, p_{r_n}\} \tag{5}$$

如果  $g_i(s_{\max A_i})$  是正态分布,可用一次二阶矩法计算  $p_{r_i}$ , 设  $\mu_{\max A_i}$  是  $s_{\max A_i}$  的均值,  $\sigma_{\max A_i}$  是  $s_{\max A_i}$  的标准差,  $\beta_i$  是结构在  $A_i$  类载荷下的可靠度指标,它的计算过程如下。

记  $\mu_{F_i}$  是  $F_i(s_{\max A_i})$  的均值,由式(2)可得:

$$\mu_{F_i} = \int_{-\infty}^{\infty} s_{\max A_i} f_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \tag{6}$$

由式(1)和式(6)可得:

$$\mu_{F_i} = \int_{-\infty}^{\infty} s_{\max A_i} m_i [G(s_{\max A_i})]^{m_i-1} \cdot g_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \tag{7}$$

式(7)进一步计算:

$$\begin{aligned} \mu_{F_i} &= m_i (\mu_{\max A_i})^{m_i-1} \\ &\cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s_{\max A_i}^{m_i-2}} s_{\max A_i} g_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \end{aligned} \tag{8}$$

为了计算方便,从保守安全角度,使得计算所得的  $\mu_{F_i}$  偏大,则对式(8)的  $s_{\max A_i}$  缩小为  $(\mu_{\max A_i} -$

$3\sigma_{\max A_i}$ ), 用来替换式(8)分母中的  $s_{\max A_i}$ , 则由式(8)可得:

$$\begin{aligned}\mu_{F_i} &= m_i(\mu_{\max A_i})^{m_i-1} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(\mu_{\max A_i} - 3\sigma_{\max A_i})^{m_i-2}} \\ &\quad \cdot s_{\max A_i} g_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \\ &= \frac{m_i(\mu_{\max A_i})^{m_i}}{(\mu_{\max A_i} - 3\sigma_{\max A_i})^{m_i-2}}\end{aligned}\tag{9}$$

记  $\sigma_{F_i}$  是  $F_i(s_{\max A_i})$  的标准差,  $D_{F_i}$  是它的方差, 由式(2)可得:

$$\begin{aligned}D_{F_i} &= \int_{-\infty}^{\infty} (s_{\max A_i} - \mu_{F_i})^2 f_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \tag{10} \\ D_{F_i} &= \int_{-\infty}^{\infty} (s_{\max A_i}^2 - 2s_{\max A_i} \mu_{F_i} + \mu_{F_i}^2) \\ &\quad \cdot f_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s_{\max A_i}^2 f_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \\ &\quad - 2\mu_{F_i} \int_{-\infty}^{\infty} s_{\max A_i} f_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \\ &\quad + \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{F_i}^2 f_i(s_{\max A_i}) ds_{\max A_i} \\ &= \mu_{\max A_i}^2 + 6\mu_{\max A_i} \sigma_{\max A_i} + 9\sigma_{\max A_i}^2 + \mu_{F_i}^2\end{aligned}\tag{11}$$

而这里有:

$$D_{F_i} = (\sigma_{F_i})^2\tag{12}$$

结合式(9)及(12), 第  $i$  类大数据下结构可靠性指标为

$$\beta_i = \frac{\mu_{\delta} - \mu_{F_i}}{\sqrt{\sigma_{\delta}^2 + D_{F_i}}}\tag{13}$$

这里,  $\mu_{\delta}$  是结构强度的均值,  $\sigma_{\delta}$  是结构强度的标准差。

对于非正态分布的载荷, 可通过当量正态化利用式(13)计算其结构可靠性指标:

$$\beta = \min\{\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_i, \cdots, \beta_n\}\tag{14}$$

则  $\beta$  为结构的最终可靠性指标, 通过反查标准正态分布表, 即可得到结构的最终可靠度。

3 算 例

国内某大跨悬索大桥<sup>[10]</sup>, 每天产生的监测数据为 3 GB, 每年有 1 TB 的大数据。采集 2015 年全年

的过往该大桥的车辆的车荷载数据, 研究桥梁薄弱环节 U 肋与顶板焊接处承受车辆载荷的可靠性。为了研究方便, 将全年过往车辆根据车辆轴数, 划分为 6 种类型: I 类型 2 轴 2 轴组, II 类型 3 轴 2 轴组, III 类型 4 轴 3 轴组, IV 类型 5 轴 3 轴组, V 类型 6 轴 3 轴组, VI 类型 6 轴 4 轴组。其中 I 类型占一年大数据的 95.60%, II 类型占 1.71%, III 类型占 1.15%, IV 类型占 0.43%, V 类型占 0.74%, VI 占 0.37%。这 6 种类型的车辆的应力均服从正态分布, 它们的均值与标准差如表 1 所示。

表 1 6 种类型车辆应力的均值与标准差

| 车辆类型 | 均值 (MPa) | 标准差 (MPa) |
|------|----------|-----------|
| I    | 22.37    | 1.961     |
| II   | 41.25    | 3.602     |
| III  | 58.80    | 5.135     |
| IV   | 75.64    | 6.606     |
| V    | 80.53    | 7.032     |
| VI   | 90.75    | 7.925     |

桥梁 U 肋与顶板焊接处的强度服从正态分布, 它的均值为 345 MPa, 标准差为 15 MPa, 在本算例中文献[10]给出的该部件理论寿命为 204 年, 实际观测计算寿命为 165 年, 根据大多数城际高速公路车辆通行强度, 再做少许放大, 这里取  $\lambda = 6$ , 由各类车辆通行所占比例, 分配  $\lambda$  如表 2 所示。

表 2 6 种类型车辆通过悬索桥的均值

| 车辆类型        | I     | II     | III   | IV     | V      | VI     |
|-------------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| $\lambda_i$ | 5.736 | 0.1026 | 0.069 | 0.0258 | 0.0444 | 0.0222 |

利用式(5)计算  $P_2, \cdots, P_i, \cdots, P_6$ , 如表 3 所示。由表 3 可以得到 U 肋板与顶板焊接部位的可靠度为 0.9999963。

从上面算例可以看出, 按照该悬索大桥的观测计算寿命时间计算 U 肋与顶板焊接处的可靠度是 0.9999963, 从而验证了该大桥在实际使用年限内是可靠的。另外, 也可以看出, 第 I 类汽车由于本身载荷小, 虽然出现的强度大, 但对 U 肋与顶板焊接部位影响较小。而第 VI 类车辆出现的强度较小, 但由

于本身载荷产生的应力较大,因而对焊接部位的可靠性影响较大,这也对桥梁的管理与维护提出了相

应要求,在必要的时候对载荷较大车辆要实行限制性通行以确保桥梁的可靠性。

表 3 6 种类型车辆载荷大数据下 U 肋与顶板焊接处可靠度

| 车辆类型      | I         | II        | III       | IV        | V         | VI        |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 可靠度 $P_i$ | 0.9999999 | 0.9999999 | 0.9999998 | 0.9999995 | 0.9999992 | 0.9999963 |

4 结 论

本文对于收集的大数据进行分析,根据其来源和分布规律。对大数据进行了分类,得到结构所承受不同类型的应力响应。然后根据应力-强度干涉理论,综合考虑不同类型的应力响应与结构的强度,给出了结构的可靠性预测的模型,根据该模型由不同类型的应力响应计算出了各自对应的可靠度,这些可靠度中的最小值就是该结构的可靠度。算例表明本文方法是可行与有效的。

参考文献

[ 1 ] Pap E, Jocić M, Szakál A, et al. Managing big data using fuzzy sets by directed graph node similarity[J]. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2017, 14(2): 183-200

[ 2 ] 欧阳秋梅,吴超,黄浪. 大数据应用于安全科学领域的基础原理研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(11): 13-18

[ 3 ] 何湘宁,石巍,李武,等. 于大数据的大容量电力电子

系统可靠性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 209-221

[ 4 ] Al-kahtani M S, Karim L. An efficient distributed algorithm for big data processing[J]. *Computer Engineering and Computer Science*, 2017, 42(8): 3149-3157

[ 5 ] 陈娇娜. 大数据驱动下的高速公路交通运行状态评价与分析[D]. 长安大学, 2016

[ 6 ] Rosà A, Chen L Y, Binder W. Failure analysis and prediction for big-data systems[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2017, 10(6): 983-998

[ 7 ] Kim Y J, Queiroz L B. Big data for condition evaluation of constructed bridges[J]. *Engineering Structures*, 2017, 141: 217-227

[ 8 ] Ponzio F C, Ditommaso R, Auletta G, et al. A fast method for structural health monitoring of Italian reinforced concrete strategic buildings[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(6): 1421-1434

[ 9 ] Reder M, Yürüşen N Y, Melero J J. Data-driven learning framework for associating weather conditions and wind turbine failures[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2018, 169(4): 554-569

[ 10 ] 马如进,徐世桥,王达磊,等. 基于大数据的大跨悬索桥钢箱梁疲劳寿命分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(6): 66-73

The structural reliability computing under the big data condition

Fang Yongfeng\*, Wang Li\*\*, Chen Zhengwei\*

(\* School of Mechanical Engineering, Guizhou University of Science Engineering, Bijie 551700)

(\*\* School of Information Engineering, Guizhou University of Science Engineering, Bijie 551700)

Abstract

Big data is playing an important role in various fields. Firstly, the big data is collected by using the structural monitoring. The big data is analyzed, and classified into the different type according to the regularities of distribution of the data. The different types of stress responses for the structure are obtained. Secondly, the structural reliability prediction model is established by using the stress - strength interference theory under the several times loads after the different types of stress responses and the structural strength would be comprehensively considered. Thirdly, the structural reliability index prediction model is established by using the first order second moment method under the several times loads that are obeying the normal distribution. Fourthly, the structural reliability is computed by using the various stress types, and its minimum reliability determines the structural reliability. Finally, The experiment result shows that the proposed method is feasible and effective.

**Key words:** big data, structure, reliability, compute