

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.14

弯扭组合梁载荷测量试验研究

王勇, 付佳豪, 田永卫, 宋昊, 齐贺阳, 倪天琦

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 对金属结构进行载荷测量, 应变法是常用方法之一。在弯矩、剪力和扭矩等单独作用下, 利用应变法测得数据的准确性以及线性相关性都很好。而实际情况中, 结构受力情况复杂, 经常受到弯矩、剪力和扭矩等耦合作用, 因此利用应变法测得的数据和输入载荷值生成的多元线性回归方程的线性相关性有待进一步验证。本文设计了一种典型的弯扭组合梁结构, 在弯矩和扭矩的耦合作用下, 利用应变法进行载荷测量, 测量数据准确性很好, 并且输入载荷值、弯矩和扭矩等多个变量生成的多元线性回归方程的线性相关性很强。

关键词: 弯扭组合梁; 应变法; 载荷测量; 耦合作用; 多元线性回归方程

中图分类号: TB93

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 02-0112-06

Experimental study on load measurement of flexural torsional composite beams

WANG Yong, FU Jiahao, TIAN Yongwei, SONG Hao, QI Heyang, NI Tianqi

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The strain method is one of the commonly used methods for load measurement of metal structures. The accuracy and linear correlation of the data measured using the strain method under the individual effect such as bending moment, shear force, and torque are very good. In reality, the structural stress situation is complex and structures are often subjected to coupling effects of bending moment, shear force, and torque. Therefore, the linear correlation between the data measured by the strain method and the multiple linear regression equation generated by the input load value needs further verification. A typical flexural-torsional beam structure is designed. Under the coupling effect of bending moment and torque, the strain method is used to measure the load. The accuracy of the measurement data is good, and the linear correlation of the multiple linear regression equations generated by multiple variables such as input load value, bending moment and torque is strong.

Key words: flexural-torsional beam; strain method; load measurement; coupling; multivariate linear regression equation

0 引言

金属结构件的内力测试在工程以及科研领域中有着广泛的应用。结构在载荷作用下所受的弯

矩、扭矩以及剪力作用有多种测量方法, 常用且比较成熟的金属结构载荷测量方法为“应变法”。利用应变法进行载荷测试, 核心内容是电阻应变式传感器^[1]的选型和贴片, 以及惠斯通电桥^[2]的

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-03-22

基金项目: 航空工业计量所创新基金(ZC02102280)

引用格式: 王勇, 付佳豪, 田永卫, 等. 弯扭组合梁载荷测量试验研究[J]. 计测技术, 2023, 43 (2): 112-117.

Citation: WANG Y, FU J H, TIAN Y W, et al. Experimental study on load measurement of flexural torsional composite beams [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43 (2): 112-117.



组桥方式。电阻应变式传感器利用了应变电阻效应^[3],即导体或半导体材料因受外力作用,电阻值随其机械变形而发生变化的物理现象^[4]。对于电阻应变式传感器主要关注其线性度、灵敏度、分辨力、迟滞等特性^[5]。惠斯通电桥是一种检测电路,准确度和灵敏度较高,不仅可以测量电学物理量,如电阻、电容、电感等,还可以通过这些物理量来间接测量非电学量,因此在仪表和自动控制领域有着广泛的应用^[6-7]。

在解决工程结构的应力应变分析时,实验应力应变分析是与理论应力应变分析并列的一种重要方法。应变法在结构载荷测试中应用十分广泛,尤其在弯矩、剪力和扭矩等单独作用下,利用应变法测得的应变码值和输入载荷值生成的一元线性方程的线性相关性非常好。但在实际应用中,结构受力情况复杂,往往受到弯矩、剪力和扭矩的耦合作用,此种情况下测得的应变码值和输入载荷值生成的多元线性回归方程的线性相关性有待进一步验证。多元线性回归方程的线性相关性对于判断应变码值的准确性和利用多元线性回归方程生成的预测载荷值的可靠性具有重要价值。

本文设计了一种典型的弯扭组合梁结构,使其只受弯矩和扭矩的耦合作用,而不受剪力的影响。在结构受到弯矩和扭矩的耦合作用时,利用应变法进行结构载荷测量,将测得的应变码值与输入载荷值进行多元线性回归分析,并对其线性相关性进行分析,从而判断在弯矩和扭矩耦合作用下,利用应变法测得应变码值的准确性以及通过多元线性回归方程生成的预测载荷值的可靠性。

1 实验准备

1.1 试验原理

如图1所示,试验需要用到的设备有弯扭组合梁、应变片、承重框架结构、数据采集系统、载荷加载系统等。将弯扭组合梁通过螺栓固定在承重框架结构上^[9]。在弯扭组合梁的测试截面上布置相应应变片,组好电阻桥路。载荷加载系统对弯扭组合梁施加载荷,数据采集系统对弯扭组合梁上相应截面的弯矩和扭矩进行采集和记录。为避免试验过程中的随机误差^[8],每组试验重复进行三次,从而保证试验数据的准确性。

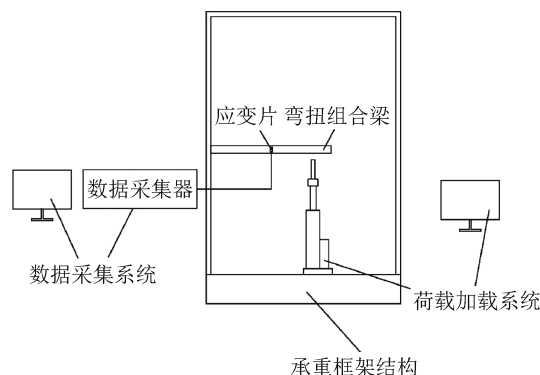


图1 试验原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of test principle

1.2 弯扭组合梁

如图2所示,设计了一种弯扭组合梁结构,由圆柱体和长方体组成。圆柱体采用无缝钢管制成的空心轴,长1100 mm,内径70 mm,外径88 mm;长方体为实体结构,长800 mm,高100 mm,厚40 mm,结构材料均为304不锈钢。



图2 弯扭组合梁

Fig.2 Flexural torsional composite beam

在长方体的自由端施加载荷,从而对弯扭组合梁圆柱体施加弯矩和扭矩的耦合作用。实验中,应变片在弯扭组合梁结构上的布片位置如图3所示。

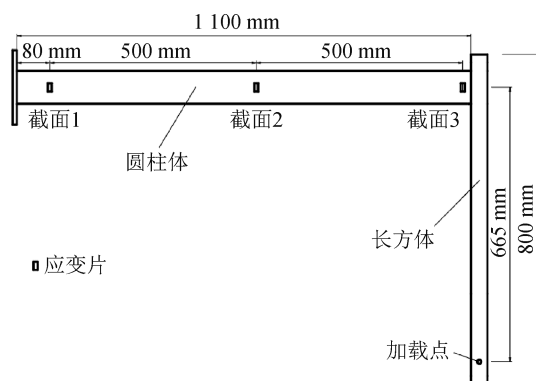


图3 弯扭组合梁结构布片位置

Fig.3 Position of strain gauge on flexural and torsional composite beam structure

示,选择三个测试截面,在任意测试截面上,测弯矩时布置四个单片,测扭矩时布置两个人字片。试验过程中,弯矩和扭矩的测量同步进行。

如图4所示,通过组惠斯通全桥的方式,分别测量在弯矩和扭矩耦合作用下各个测试截面的弯矩值和扭矩值。

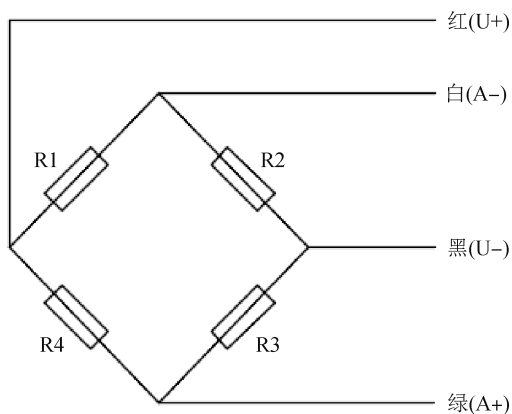


图4 惠斯通全桥
Fig.4 Wheatstone bridge

1.3 数据采集系统

如图5所示,数据采集系统主要由数据采集器^[10]、接线盒、电源盒、笔记本电脑等组成。为了保证载荷测试数据的真实性和可靠性,采用国内外飞行测试中广泛使用的KAM-500数据采集系统,对试验过程中受到的弯矩和扭矩进行测量和记录。该数据采集系统功能强大,试验测试过程中可实时生成试验数据模拟曲线,方便及时判断试验数据是否合理。

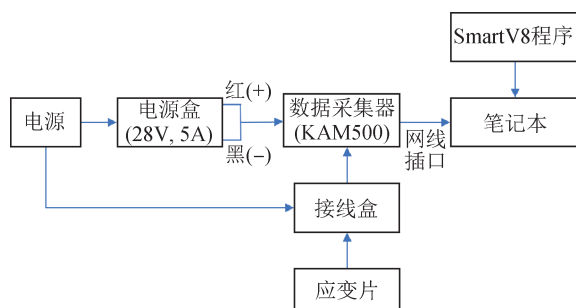


图5 数据采集系统
Fig.5 Data acquisition system

电源盒为数据采集器提供稳定的激励电压,应变片按照惠斯通电桥组全桥的方式连接到接线盒上。数据采集器测得应变片在载荷作用下对应

输出的各组信号,经过处理后传递到笔记本电脑,完成试验数据的采集和记录。

1.4 载荷加载系统

如图6所示,载荷加载系统主要由伺服作动器、控制器、电机盒、笔记本电脑等组成。控制器和电机盒控制伺服作动器,伺服作动器直接在弯扭组合梁上施加载荷作用,由其上的力值传感器^[11]确定施加在弯扭组合梁上的载荷大小,笔记本电脑显示载荷大小并进行记录。

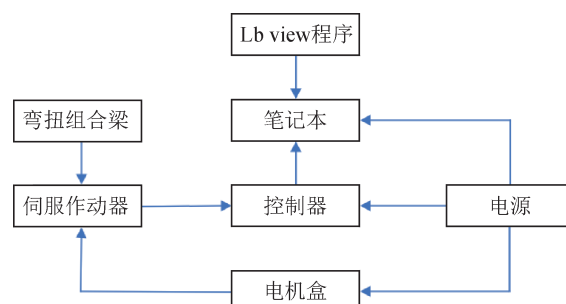


图6 载荷加载系统
Fig.6 Load loading system

如图7所示,伺服作动器可提供拉向和压向的载荷,并且力值传感器根据所施加载荷的最大值选择合适的量程,本试验力值传感器选择1 t的量程,从而提高输入载荷的准确性。



图7 加载装置实物图
Fig.7 Physical drawing of loading device

2 试验测量

如图8所示,在距离地轨1.5 m处,将弯扭组合梁固定在承重框架上;通过承重框架上的地轨将伺服作动器固定,根据加载需求调整伺服作动器的固定位置。通过伺服作动器上的力值传感器^[12]和配套程序软件测量并实时显示出作用在弯扭组合梁上的载荷大小,从而实现在弯扭组合梁上精准施加弯矩和扭矩耦合作用的目的。



图8 试验测量

Fig. 8 Test measurement

试验采用组全桥的工作方式,以提高试验精度^[13]。在正式试验开始前,先进行弯扭组合梁载荷加载的预实验,对弯扭组合梁重复进行三次载荷加载和卸载过程,目的是使应变片上的应变栅产生准确的应变变形,并和试验结构件的应变变形保持一致,从而提高试验测试数据的准确性。

正式试验分为2 000 N试验测试和3 000 N试验测试。两组试验均采用逐级加载和逐级卸载的方式进行测量。2 000 N试验测试最大载荷为2 000 N,在加载过程中载荷依次增加400 N,在卸载过程中载荷依次减少400 N,重复进行三组试验。3 000 N试验测试最大载荷为3 000 N,在加载过程中载荷依次增加500 N,在卸载过程中载荷依次减少500 N,重复进行三组试验。

3 试验数据处理

3.1 原始数据处理

在2 000 N和3 000 N的试验测试中,分别在弯

扭组合梁的圆柱体选择3个截面进行弯矩和扭矩测量,通过数据采集系统测得对应的试验数据码值,分别记录3次。

在进行试验数据处理时,为更好地分析试验数据的相关性,剔除载荷卸载过程中测得的试验数据,只保留载荷加载过程中测得的试验数据。为避免试验过程中的随机误差造成的试验数据不准确,需要对弯扭组合梁载荷加载过程中测得的试验数据进行多次取平均值的操作,结果如表1和表2所示,“ M_1 , M_2 , M_3 ”分别表示截面1、截面2、截面3的弯矩桥输出码值,“ T_1 , T_2 , T_3 ”分别为截面1、截面2、截面3的扭矩桥输出码值。

表1 2 000 N试验数据的平均值

Tab. 1 Average value of 2 000 N test data

力值/N	M_1	M_2	M_3	T_1	T_2	T_3
0	0	0	0	0	0	0
400	1 582	786	32	-706	-709	-707
800	3 178	1 579	37	-1 435	-1 438	-1 436
1 200	4 771	2 376	43	-2 154	-2 159	-2 157
1 600	6 337	3 155	51	-2 872	-2 875	-2 873
2 000	7 929	3 943	59	-3 605	-3 608	-3 606

表2 3 000 N试验数据的平均值

Tab. 2 Average value of 3 000 N test data

力值/N	M_1	M_2	M_3	T_1	T_2	T_3
0	0	0	0	0	0	0
500	1 925	959	85	-864	-863	-863
1 000	3 885	1 933	99	-1 764	-1 760	-1 762
1 500	5 903	2 935	112	-2 681	-2 669	-2 675
2 000	7 854	3 902	135	-3 580	-3 563	-3 571
2 500	9 900	4 907	153	-4 477	-4 464	-4 471
3 000	12 054	5 909	180	-5 358	-5 365	-5 361

3.2 线性回归方程

将表1和表2的试验数据进行多元线性回归分析^[14-15],分析弯扭组合梁截面的弯矩、扭矩和载荷之间的线性相关性。以测试截面1和测试截面2为例,分析其线性相关性,得到多元线性回归方程为

$$y = k_1 M_1 + k_2 M_2 + k_3 T_1 + k_4 T_2 \quad (1)$$

式中: k_1 , k_2 分别为测试截面1、测试截面2的弯矩

影响系数; k_3 , k_4 分别为测试截面1、测试截面2的扭矩影响系数; y 为载荷值, N。

将表1和表2的数据带入式(1), 可得表3和

$$y = 0.626\,93 \times M_1 - 0.262\,44 \times M_2 - 2.660\,27 \times T_1 + 3.194\,84 \times T_2 \quad (2)$$

$$y = -0.446\,16 \times M_1 + 0.856\,31 \times M_2 + 2.116\,84 \times T_1 - 2.731\,48 \times T_2 \quad (3)$$

表3和表4中的 R^2 表示线性相关系数, 线性相关系数越趋近于1, 多元变量之间的线性相关性越强。

表3 2 000 N 试验中截面1和截面2的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient between section 1 and section 2 in 2 000 N test

参数	系数	标准误差	R^2
k_1	0.626 93	0.389 846	0.999 999 267
k_2	-0.262 44	0.533 215	
k_3	-2.660 27	1.608 656	
k_4	3.194 84	1.998 595	

表4所示测试截面1和2的相关系数, 从而得到2 000 N和3 000 N试验的多元线性回归方程分别为

同理, 进行不同截面的弯矩、扭矩和载荷之间的多元线性回归分析, 可得如表5所示的不同截面的线性相关系数。

表4 3 000N 试验中截面1和截面2的相关系数

Tab.4 Correlation coefficient between section 1 and section 2 in 3 000N test

参数	系数	标准误差	R^2
k_1	-0.446 16	0.286 923	0.999 993 100
k_2	0.856 31	0.625 365	
k_3	2.116 84	1.753 997	
k_4	-2.731 48	2.244 956	

表5 不同截面的线性相关系数

Tab.5 Linear correlation coefficient of different sections

组合情况	截面1和截面2	截面1和截面3	截面2和截面3	截面1和截面2和截面3
2 000N的 R^2	0.999 999 267	0.999 998 680	0.999 998 253	0.999 999 999
3 000N的 R^2	0.999 993 100	0.999 999 695	0.999 999 259	0.999 999 998

4 结论

通过上述分析可知, 弯扭组合梁在弯矩和扭矩耦合作用下, 利用应变法进行载荷测量, 在保证试验数据测量准确的前提下, 得到的输入载荷与所测得的弯矩和扭矩之间具有很强的线性相关性, 后续可通过生成的多元线性回归方程预测施加在金属结构上的载荷大小。

利用应变法进行载荷测试时, 应变片的布片位置、组桥方式以及数据处理方法等都对试验结果有影响。因此在进行复杂结构的弯矩和扭矩耦合作用下的载荷测试时, 应充分考虑这些影响因素, 从各个方面提高试验数据的准确性, 从而更好地进行多元线性回归分析, 研究变量之间的相关性。

参考文献

- [1] 李盼菲. 电阻应变测量中提高精度的方法研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(12): 62-64.
LI P F. Research on methods to improve precision in resistance strain measurement [J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(12): 62-64. (in Chinese)
- [2] 张丽琴, 徐士涛. 惠斯通电桥原理及应用研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2018, 34(7): 88-90.
ZHANG L Q, XU S T. Research on the principle and application of wheatstone bridge [J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2018, 34(7): 88-90. (in Chinese)
- [3] 闫好奎, 任建国. 电阻应变片的工作原理[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(4): 12.
YAN H K, REN J G. Working principle of resistance strain gauge [J]. Measurement & Measurement Technique, 2013, 40(4): 12. (in Chinese)

- [4] 孙辉, 韩玉龙, 姚星星. 电阻应变式传感器原理及其应用举例[J]. 物理通报, 2017 (5): 82-84.
SUN H, HAN Y L, YAO X X. Principles and application examples of resistance strain sensor[J]. Physics Bulletin, 2017 (5): 82-84. (in Chinese)
- [5] 李岢. 电阻应变式传感器测量性能分析[J]. 电子元件与信息技术, 2020, 4 (2): 153-155.
LI K. Measurement performance analysis of resistance strain gauge sensors[J]. Electronic Components And Information Technology, 2020, 4 (2): 153-155. (in Chinese)
- [6] 汪洪, 赵青生, 夏传鸿, 等. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
WANG H, ZHAO Q S, XIA C H, et al. Physical experiment of college [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese)
- [7] 沈观林. 应变电测与传感器技术的新发展及应用[J]. 中国测试, 2011, 37 (2): 87-91, 96.
SHEN G L. New development and application of strain electrical measurement and sensor technology[J]. China Measurement & Test, 2011, 37 (2): 87-91, 96. (in Chinese)
- [8] 袁明. 电阻应变式传感器误差原因以及补偿方法[J]. 电子技术与软件工程, 2019 (9): 227.
YUAN M. Causes of error and compensation methods for resistance strain gauge sensors[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(9): 227. (in Chinese)
- [9] 陈玉峰. 高强度钢材焊缝及螺栓连接的受力性能和设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
CHEN Y F. Research on the mechanical properties and design methods of high strength steel welds and bolted connections [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)
- [10] 胡庆武. 基于KAM500采集器的测试系统设计[J]. 现代电子技术, 2014, 37 (03): 108-109, 113.
HU Q W. Design of test system based on KAM500 collector [J]. Modern Electronic Technique, 2014, 37 (03): 108-109, 113. (in Chinese)
- [11] 赵印明, 陈柯行, 柴继新, 等. 一种四柱式高精度电阻应变式力传感器[J]. 计测技术, 2017, 37 (S1): 129-133.
ZHAO Y M, CHEN K X, CHAI J X, et al. A four column high-precision resistance strain gauge force sensor [J]. Measurement & Measurement Technology, 2017, 37 (S1): 129-133. (in Chinese)
- [12] 李自武, 沈运杰, 张磊, 等. 力传感器检定和使用中相关问题探讨[J]. 计测技术, 2013, 33 (S1): 56-58.
LI Z W, SHEN Y J, ZHANG L, et al. Exploration of relevant issues in the verification and use of force sensors[J]. Measurement & Measurement Technology, 2013, 33 (S1): 56-58. (in Chinese)
- [13] 雷一鸣. 电阻应变计应变传递研究及误差分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (32): 8096-8100.
LEI Y M. Research on strain transfer and error analysis of resistance strain gauges[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11 (32): 8096-8100. (in Chinese)
- [14] 冷建飞, 高旭, 朱嘉平. 多元线性回归统计预测模型的应用[J]. 统计与决策, 2016 (7): 82-85.
LENG J F, GAO X, ZHU J P. Application of multiple linear regression statistical prediction model[J]. Statistics & Decision, 2016 (7): 82-85. (in Chinese)
- [15] 陈国钧. 建立多元线性回归方程的广义逆方法[J]. 武汉交通科技大学学报, 1996 (4): 505-509.
CHEN G J. Generalized inverse method for establishing multiple linear regression equations[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 1996 (4): 505-509. (in Chinese)

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 王勇 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为载荷测试和力学分析。