

基于多元回归的锚索测力计数据修正法及应用

侯光强¹, 彭浩²

(1. 贵州乌江水电开发有限责任公司思林发电厂, 贵阳 565109; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081)

摘要: 预应力锚索在岩土工程加固中广泛应用, 通常采用锚索测力计对锚索的有效预应力进行长期监测, 利用锚索测力计的测值准确计算锚索的实际荷载尤为关键。对锚索测力计现有数据修正方法进行探讨, 同时结合大量的工程实测数据, 提出了在不改变仪器自身系数的情况下采用多元回归分析法对锚索测力计数据进行修正的方法。实际应用结果表明, 此方法的计算结果精度较高, 能够反映结构物的真实运行情况。

关键词: 锚索测力计; 多元回归; 数据修正; 精度

中图分类号: O 212. 4; TV 223. 2⁺ 4

文献标志码: B

文章编号: 1674 - 1951(2016)12 - 0021 - 04

0 引言

预应力锚固技术已经广泛应用于岩土工程中, 是一种行之有效的工程技术。在预应力锚索长期工作过程中, 不可避免地会出现预应力损失现象, 而对工程安全稳定起决定性作用的则是施加于锚索上的长期稳定的预应力, 即有效预应力, 由此, 对锚索预应力进行长期监测, 关注其实际变化情况, 就显得尤为重要, 通常采用的手段是在施加预应力的锚索端部安装锚索测力计。

目前, 应用较为广泛的锚索测力计为圆环状, 沿其圆周均匀内置有几支压力传感器, 通过监测这几支压力传感器的输出值, 采用仪器率定参数来计算锚索上的实际荷载。通常情况下, 仪器率定是在实验室内完成的, 因此仅适用于准确计算锚索测力计处于单轴受拉压状态时的荷载。而在实际情况中, 受外界条件的影响, 很难保证锚索测力计一直处于轴心受力状态; 同时, 受其自身耐久性的影响, 内置传感器也会出现某一支或某几支失效的情况, 此时若仍采用初始率定系数来计算锚索实际吨位, 将出现较大的误差甚至是错误。

国内许多从事安全监测的专家学者对锚索测力计处于偏心受力状态且内置传感器失效后的锚索实际预应力计算进行了一些有益的研究, 提出的方法主要有仪器参数简单修正法、仪器综合系数修正法、单支传感器仪器系数修正法^[1-3]。仪器参数简单修正法和仪器综合系数修正法均可对锚索测力计数据进行一定的修正, 且较为方便快捷, 利于现场实施, 但是这两种方法的计算结果精度不甚理想, 且均未

考虑锚索测力计处于偏心受力状态的情况。单支传感器仪器系数修正法虽然计算结果误差较小, 同时也考虑了锚索测力计处于偏心受力状态时的数据修正, 但是仪器厂家通常仅提供整套仪器的率定资料, 而不会提供锚索测力计内置的单支传感器的出厂率定资料, 施工现场更无法对单支传感器进行率定, 由此获取单支传感器的系数在多数情况下是无法实现的, 而且处理数据量大、可操作性较差。

通常将锚索测力计作为均质各向同性的弹性体来考虑, 其在单轴受力状态时, 作用于仪器上的轴向荷载为均布荷载, 因此其内置的几支传感器上的作用力相等, 然后通过计算几支传感器输出值的平均值, 结合综合率定系数即可求出锚索上的作用荷载。在实际使用过程中, 当出现偏心受力时, 可近似认为其处于弹性变形状态而未发生明显的挠曲变形, 因此其内置的各支传感器在偏心两侧的输出值会同步增大或者减小, 总输出值的平均值也会发生改变, 此时仍然采用综合率定系数进行荷载计算是可行的。当某一支或某几支传感器失效时, 锚索测力计的自身特性并没有明显变化, 意味着其综合率定参数仍然适用, 只是在偏心受力状态下, 由于各支传感器输出值差异较大, 此时继续使用其综合率定参数, 取各支传感器输出值的平均值来计算最终荷载将会出现较大的误差甚至错误。笔者认为, 盲目地修正仪器的系数是值得商榷的, 因为无论在何种情况下, 仪器系数属于仪器自身特性, 即使内置的某支传感器失效, 也不会引起其自身系数的明显改变。本文通过对大量的锚索测力计现场监测数据进行分析, 基于多元回归理论, 并结合锚索实际受力情况, 研究了锚索测力计在处于偏心受力状况和内置传感器失效情况下的监测数据修正方法, 为现场监测人员高效准

确计算锚索测力计的实际荷载提供一些参考。

1 多元回归数据修正方法

绝大多数情况下,锚索测力计本身并无明显挠曲变形,在弹性变形下其内置的各支传感器的输出值是近似同步增大或减小的,即使在偏心受力状态下,各支传感器的输出值在偏心两侧仍然表现出同步增大或减小的规律,各传感器的输出值与参与计算的总输出值的平均值存在一定的相关性,因此,采用多元回归的方法进行数据的修正得到实际测值的一个合理范围是较为适宜的。

多元回归分析是通过大量的数据找到多个自变量与因变量之间的关系,并对二者之间的关系式进行精度评价,最终合理预测结果的一种数理统计方法。对于一台内置 n 支传感器的锚索测力计,其输出值主要包括温度 t 、输出值 1、输出值 2、…、输出值 n 。在仪器完好的情况下,将锚索测力计的实际温度输出值作为自变量 t ,各传感器输出值作为自变量 X_1 (输出值 1)、…、 X_n (输出值 n),将输出值 1、输出值 2、…、输出值 n 的平均值作为因变量 Y ,采用 Excel 数据分析功能或 Spass 软件等常用回归分析工具对锚索测力计测值进行多元回归分析,得到最终参与计算的数据平均值 Y 的计算公式

$$Y = at + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + c,$$

式中: a 为温度的系数; b_1, b_2, \dots, b_n 均为各传感器输出值的系数; c 为常数项。

对上述拟合公式进行精度检验。

(1) 复相关系数 R 。用以衡量自变量 X 与因变量 Y 直接的相关程度,通常 R 值在 0.85 以上就表明相关性较好,为保证结果的精度,在锚索测力计数据处理中,建议 R 值保证在 0.93 及以上为宜。

(2) 标准误差。衡量拟合程度的大小,此值越小表明拟合效果越佳。

(3) 整体公式的显著性 F 统计量的 P 值。此值如果小于显著性水平 0.05,表明回归方程效果显著;同时,某自变量的 P 值如果远小于显著性水平 0.05,表明该自变量与因变量之间相关性明显,如果

某自变量的 P 值远大于其他几个变量则表明该自变量与因变量之间的相关性较弱,有时可适当剔除。

2 工程应用实例

位于贵州省思南县境内的思林水电站为碾压混凝土重力坝,大坝坝身布置 7 孔溢流表孔泄洪。闸墩采用预应力闸墩并布置预应力锚索,有 16 台锚索测力计对锚索张拉和后期预应力变化进行长期监测,以了解闸墩应力变化情况。各锚索测力计在安装初期均运行良好,2008 年 11 月安装的 1 台主锚索测力计(内置 6 支传感器)由于运行时间较长,其内置的 1 支传感器(#6 传感器)在 2013 年 1 月失效,2015 年 7 月另一支传感器(#3 传感器)也失效,在失效后采用仪器参数简单修正法对数据进行修正,计算结果见表 1。

从表 1 可知,2013 年 1 月 1 日 #6 传感器失效,进行简单修正后,与 2012 年 12 月 23 日相隔仅 1 周的锚索计算结果相差 164.68 kN,此阶段外部环境未发生明显改变,临近区域也无任何施工作业、震动爆破或泄洪等,而锚索预应力却发生明显衰减,不符合常规。2015 年 7 月 6 日,该台锚索测力计的 #3 传感器也失效,采用同样的方法进行简单修正后,与 7 月 3 日的锚索计算结果相比,竟衰减了 208.90 kN,该期间大坝正在泄洪,如果将其归结为泄洪影响导致的预应力衰减,势必将作出错误的判断,对工程安全稳定运行造成影响。

通过对比 2012 年 12 月 23 日和 2013 年 1 月 1 日的两次观测值不难发现,除去失效的 #6 传感器,其余 5 支传感器的输出值均出现明显的变化,输出值变化量介于 $-5.30 \sim 2.80$ Hz,且增大值与减小值的绝对值基本相当,锚索测力计测值可近似认为同步增大与减小,亦即表明锚索受力未发生明显改变,但最终的计算结果却相差 164.68 kN,明显不合理,需要进一步修正。采用多元回归的方式进行修正后,2012 年 12 月 23 日和 2013 年 1 月 1 日的两次观测结果仅相差 0.09 kN,表明中孔闸墩锚索未见明显变化,闸墩处于安全运行状态。计算结果见表 2,多

表 1 仪器参数简单修正法修正成果

观测日期	温度/ ℃	传感器输出值/Hz						平均值	计算结果/kN
		#1	#2	#3	#4	#5	#6		
2008-11-24	14.10	7593.90	7314.30	7327.80	7513.50	7311.80	7318.50	7396.63	—
2012-12-23	13.50	5837.90	6144.80	5374.90	5969.80	6147.90	5320.70	5799.33	2794.81
2013-01-01	14.00	5840.70	6145.00	5371.80	5964.50	6145.80		5893.56	2630.13
2015-07-03	27.00	5834.10	6108.90	5385.00	5972.80	6151.80		5890.52	2640.84
2015-07-06	27.00	5828.00	6105.10		5963.10	6143.40		6009.90	2431.94

多元回归分析成果见表 3,平均值 $Y = -407.541 + 0.115271t - 0.04782X_1 + 0.012223X_2 + 0.193607X_3 + 0.804307X_4 + 0.093123X_5$ 。

同理,采用上述方法对 #3 传感器失效后的该台锚索测力计观测数据进行修正,得到 2015 年 7 月 3 日和 2015 年 7 月 6 日的锚索计算吨位分别为

2780.57,2798.05 kN,锚索预应力增大 17.48 kN,也合理反映了该时段内大坝中孔正在泄洪的情况。计算结果见表 4,多元回归分析成果见表 5,平均值 $Y = -905.836 - 0.08972t + 0.130363X_1 - 0.20334X_2 + 1.11174X_4 + 0.091307X_5$ 。

表 2 多元回归数据修正法观测成果

观测日期	温度/ ℃	传感器输出值/Hz						平均值	计算结果/kN
		#1	#2	#3	#4	#5	#6		
2008-11-24	14.10	7593.90	7314.30	7327.80	7513.50	7311.80	7318.50	7396.63	—
2012-12-23	13.50	5837.90	6144.80	5374.90	5969.80	6147.90	5320.70	5799.33	2794.81
2013-01-01	14.00	5840.70	6145.00	5371.80	5964.50	6145.80		5799.50	2794.72

表 3 多元回归分析成果

回归统计	项目		数值				
	复相关系数 R		0.974927				
	复测定系数 R^2		0.950483				
	调整后的复测定系数 R^2		0.947944				
	标准误差		7.622248				
	观测值个数		124				
方差分析	项目	自由度 DF	方差 SS	均方差 MS	F 检验	显著性 F	
	回归分析	6	130479.5	21746.59	374.3045	7.16143E-74	
	残差	117	6797.543	58.09866			
	总计	123	137277.1				
因子系数	项目	回归系数	标准误差	t Stat	P 值	下限 95%	上限 95%
	常数项 c	-407.541	261.1801	-1.56038	0.121371	-924.7941821	109.7127900
	因子 t (温度测值)	0.115271	0.157657	0.731152	0.466148	-0.196960093	0.4275022
	因子 X_1 (#1 传感器测值)	-0.04782	0.09467	-0.50513	0.614416	-0.235308859	0.1396676
	因子 X_2 (#2 传感器测值)	0.012223	0.079178	0.154368	0.877586	-0.144585582	0.1690307
	因子 X_3 (#3 传感器测值)	0.193607	0.054951	3.523265	0.000609	0.084779202	0.3024340
	因子 X_4 (#4 传感器测值)	0.804307	0.115604	6.957456	2.13E-10	0.575360381	1.0332544
	因子 X_5 (#5 传感器测值)	0.093123	0.009267	10.04934	1.66E-17	0.074770750	0.1114746

表 4 多元回归数据修正法观测成果

观测日期	温度/ ℃	传感器输出值/Hz						平均值	计算结果/kN
		#1	#2	#3	#4	#5	#6		
2008-11-24	14.10	7593.90	7314.30	7327.80	7513.50	7311.80	7318.50	7396.63	—
2012-12-23	13.50	5837.90	6144.80	5374.90	5969.80	6147.90	5320.70	5799.33	2794.81
2013-01-01	14.00	5840.70	6145.00	5371.80	5964.50	6145.80		5799.50	2794.72
2015-07-03	27.00	5834.10	6108.90	5385.00	5972.80	6151.80		5810.67	2780.57
2015-07-06	27.00	5828.00	6105.10		5963.10	6143.40		5800.44	2798.05

表 5 多元回归分析成果

回归统计	项目		数值				
	复相关系数 R		0.972229				
	复测定系数 R^2		0.945229				
	调整后的复测定系数 R^2		0.942909				
	标准误差		7.982367				
	观测值个数		124				

续表

方差分析	项目	自由度 df	方差 SS	均方差 MS	F 检验	显著性 F	
	回归分析	5	129758.3	25951.67	407.2882	1.21484E-72	
	残差	118	7518.745	63.71818			
	总计	123	137277.1				
因子系数	项目	回归系数	标准误差	t Stat	P 值	下限 95%	上限 95%
	常数项 c	-905.836	229.947700	-3.939310	0.000139	-1361.194586	-450.4765
	因子 t(温度测值)	-0.089720	0.153451	-0.584680	0.559876	-0.393595232	0.2141545
	因子 X ₁ (#1 传感器测值)	0.130363	0.083810	1.555462	0.122514	-0.035603411	0.2963302
	因子 X ₂ (#2 传感器测值)	-0.203340	0.052631	-3.863610	0.000183	-0.307567919	-0.0991220
	因子 X ₄ (#4 传感器测值)	1.111740	0.079413	13.999440	7.74E-27	0.954480432	1.2689998
	因子 X ₅ (#5 传感器测值)	0.091307	0.009689	9.423479	4.65E-16	0.072119745	0.1104948

3 结论

在弹性变形下,锚索测力计内置的各支传感器的输出值是近似同步增大或者减小的,即使在偏心受力状态下,各支传感器的输出值在偏心两侧仍然表现出同步增大或者减小的规律,各传感器的输出值与参与计算的总输出值的平均值存在一定的相关性。

在综合考虑影响锚索测力计测值变化的情况下,不需要修正仪器自身参数,可采用多元回归的方法进行数据的修正,得到一个合理的实际测值范围,其结果精度很好,但本数学模型的长期稳定性仍是一个需要继续研究的问题。

(上接第 17 页)与安全网关互动,自动完善防御策略,阻挡再次入侵,形成主动、被动防御体系的联动^[8-9]。

5 结束语

变电站大量应用网络技术传输信息,其安全性和可靠性愈显突出。制定信息安全防御的策略是一个系统性的问题,仅凭借单一的防御手段不能有效解决问题。采用主动防御和被动防御相结合的网络安全方案,可以为信息安全构筑双重防线,建立起一个立体的防护体系。

参考文献:

[1]莫峻,谭建成. 基于 IEC 61850 的变电站网络安全分析[J]. 电力系统通信,2009,30(4):12-16.
 [2]高吉普,徐长宝,胡炎. 智能变电站二次系统安全性定量评价方法的研究[J]. 电器与能效管理技术,2014(7):47-51,67.
 [3]徐东伟,陈惠,陈志源,等. 智能变电站网络安全策略分析与研究[J]. 电力安全技术,2016,18(4):1-4.

参考文献:

[1]汪志福. 弦式锚索测力计仪器系数修正方法探讨[J]. 水电自动化与大坝监测,2005,29(3):60-63.
 [2]徐闽,张平. 弦式锚索测力计仪器系数修正方法研究[J]. 中国科技信息,2014(2):32-33.
 [3]周启,李刚,王秘学. 弦式锚索测力计数据缺陷修正方法探讨[J]. 大坝与安全,2006(6):44-47.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

侯光强(1986—),男,贵州遵义人,助理工程师,从事水电站水工建筑物维护方面的工作(E-mail:331809469@qq.com)。

[4]侯伟宏. 数字化变电站系统的可靠性与安全性研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
 [5]高春雷,耿群峰,陈亮. 变电站通信网络安全分析与实现[J]. 江苏电机工程,2008,27(6):27-29.
 [6]严童,谢吉华,温立超,等. 智能变电站 TCP/IP 通信网络的安全解决方案[J]. 电气自动化,2013,35(5):44-45,60.
 [7]钟伟杰. 试论网络安全访问的规划与建设[J]. 信息安全与技术,2011,2(6):6-8.
 [8]盛兆勇. IEC 61850 安全性分析及解决方案研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
 [9]李彬,温蜜,齐钰. 智能电网 AMI 系统中一种新型密钥管理方案[J]. 计算机应用与软件,2016,33(1):321-325.

(本文责编:刘炳锋)

作者简介:

姚亮(1979—),男,江苏南京人,高级工程师,从事智能变电站二次设备技术研究和应用开发工作(E-mail:liang-yao@sac-china.com)。

邹磊(1982—),男,吉林长春人,工程师,从事智能变电站二次设备技术研究和应用开发工作。

韩志勇(1988—),男,吉林敦化人,工程师,从事智能变电站二次设备技术研究和应用开发工作。