DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.010
魏晓斌, 黄耀英, 赵龙, 等. 基于矩法的高拱坝实际温度荷载反馈[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 76-81. (WEI Xiao-bin, HUANG Yao-ying, ZHAO Long, et al. Feedback analysis of actual temperature loads of high arch dam based on moment method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 76-81.)

基于矩法的高拱坝实际温度荷载反馈

魏晓斌[1], 黄耀英[2], 赵 龙[3], 王西林[1]

(1. 兰州交通大学 博文学院, 甘肃 兰州 730100; 2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 甘肃省水利厅 甘肃 兰州 730030)

摘要: 温度荷载是拱坝的主要设计荷载之一,与封拱温度、环境气温、库水水温等关系密切,实际温度荷载难免与设计温度荷载存在一定差异,传统点式温度计监测数据信息量少,难以进行合理有效的拱坝温度荷载反馈。结合溪洛渡特高拱坝典型坝段分布式光纤顺河向实测温度,基于矩法进行高拱坝实际温度荷载反馈,即采用多项式表示等效温度,根据等效温度的各阶矩与分布式光纤顺河向实测温度相应的各阶矩相等,确定多项式的系数,进而得到等效温度的分布。分析表明,现有规范采用的全截面线性化等效温度仅是非线性等效温度在一次矩等效时的特例,通过计算2阶和3阶矩等效温度,获得坝段截面非线性温度分布,更加全面反映高拱坝从封拱灌浆到水库正常运行期间坝体温度的调整过程,可为拱坝设计提供有益的技术补充。

关 键 词: 矩法; 高拱坝; 温度荷载; 分布式光纤测温; 反馈

中图分类号: TV698.1^{+}1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)03-0076-06

温度荷载[1-3]是拱坝的主要设计荷载之一,它是拱坝接缝灌浆后坝体准稳定温度场与封拱时温度场之间的温差产生的荷载。由于拱坝的温度场为时间的函数,从坝体灌浆到水库正常运行,坝内温度不断变化。现有规范一般采用封拱温度、运行期年平均温度场和运行期变化温度场等3个特征温度场的全截面线性等效温度来计算拱坝的温度荷载。

由于等效线性温度并非真实温度,而是虚拟温度,虽然在直线法假设下,其力学作用与真实温度等效,但忽略不计的非线性温度变化是引起坝体表面裂缝的重要原因。拱坝温度荷载与封拱温度、环境气温、库水水温等关系密切,实际温度荷载难免与设计温度荷载存在一定差异[4-6]。目前一般采用点式温度计进行混凝土坝温度监测,由于传统点式温度计监测的信息量少,导致难以进行合理有效的拱坝温度荷载反馈。例如吴中如等基于实测温度对拱坝温度荷载中的平均温度进行了反馈,并与美国垦务局公式(截面平均温度经验公式)进行了对比。吴中如等采用的实测温度仅为测温断面若干支点式温度计测值,由于实测温度信息少,在一定程度上影响实际温度荷载反馈的精度[7]。分布式光纤具备有线监测和实时在线监测的优势,只要把分布式光纤埋设在混凝土浇筑仓内,即可快速、连续地监测光纤传感网络沿程的温度值,这样采用分布式光纤测温可以直观、方便地获得坝体灌浆到水库正常运行顺河向温度分布值。目前,分布式光纤测温系统在三峡、百色、小湾、光照、溪洛渡等工程得到应用[8-11]。但目前基于分布式光纤测温进行高拱坝实际温度荷载的反馈尚未见报道,本文结合溪洛渡特高拱坝典型坝段分布式光纤顺河向实测温度,采用矩法探讨高拱坝实际温度荷载的反馈。

收稿日期: 2015-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209124)

作者简介: 魏晓斌(1988—),男,甘肃平凉人,助教,硕士研究生,主要从事大体积混凝土温控防裂方面的教学与科研工作。E-mail: suesong0818@sina.cn

1　基于矩法的实际温度荷载反馈原理

1.1　矩法原理

矩法同伽辽金法相似，属于加权余量的一种[12-13]。矩法采用一个完备的函数集作为权函数，一般取权函数为 1，x，x^2，x^3，…，假设 $f(x)$ 为任意函数，则 $f(x)$ 的各阶矩为

$$\begin{cases} M_0 = \int 1 f(x)\,\mathrm{d}x \\ M_1 = \int x f(x)\,\mathrm{d}x \\ M_2 = \int x^2 f(x)\,\mathrm{d}x \\ \vdots \qquad\quad \vdots \end{cases} \tag{1}$$

式中：M_0，M_1，M_2，…可看作是函数 $f(x)$ 的零阶矩、一阶矩、二阶矩以及高阶矩。

矩法可进行函数的多项式逼近，设 $f(x)$ 的拟合多项式函数为

$$\bar{f}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots \tag{2}$$

式中：a_0，a_1，a_2，a_3，…为待定系数。

设余量 $R(x) = f(x) - \bar{f}(x)$，则余量的加权积分为

$$\begin{cases} \int 1R(x)\,\mathrm{d}x = 0 \\ \int xR(x)\,\mathrm{d}x = 0 \\ \int x^2 R(x)\,\mathrm{d}x = 0 \\ \vdots \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} M_0 = \int 1 f(x)\,\mathrm{d}x = \int 1\bar{f}(x)\,\mathrm{d}x \\ M_1 = \int x f(x)\,\mathrm{d}x = \int x\bar{f}(x)\,\mathrm{d}x \\ M_2 = \int x^2 f(x)\,\mathrm{d}x = \int x^2\bar{f}(x)\,\mathrm{d}x \\ \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \end{cases} \tag{3}$$

1.2　等效温度

取坝体某一高程断面为研究对象，假定只考虑坝体厚度（L）方向的热传导，忽略坝体断面竖向的热传导，实际温度与线性等效温度对比如图 1。设实际的温度分布为 $T(x)$，设等效温度为

$$\bar{T}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots$$

则 $M_0 = \int 1T(x)\,\mathrm{d}x$，$M_1 = \int xT(x)\,\mathrm{d}x$，$M_2 = \int x^2 T(x)\,\mathrm{d}x$，…

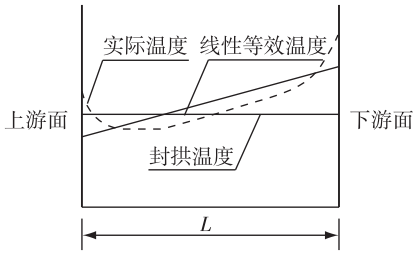


图 1　坝体断面实际温度与线性等效温度对比

Fig. 1　Comparison of actual temperature and linear equivalent temperature of dam sections

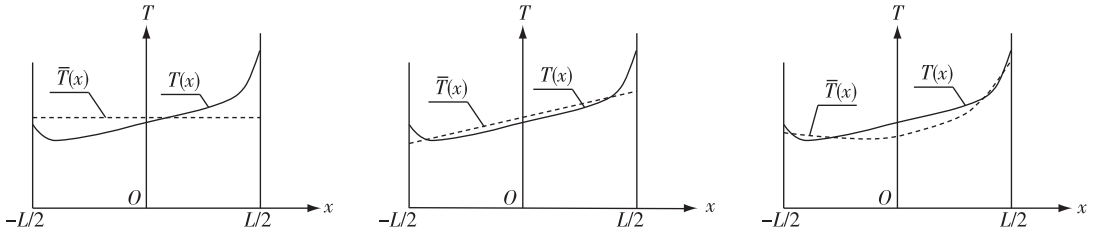
令等效温度 $\bar{T}(x)$ 与实际温度 $T(x)$ 满足矩等效条件式（3），通过求解线性方程组确定系数 a_0，a_1，a_2，a_3…的值，从而可得到等效温度的分布函数 $\bar{T}(x)$，如图 2 中虚线所示。

（1）0 阶矩等效温度。设 0 阶等效温度分布 $\bar{T}_0(x) = a_0$，如图 2（a）所示，根据式（3）有

$$\int_{-L/2}^{L/2} a_0 = M_0 \quad \Rightarrow \quad a_0 = M_0 / L \tag{4}$$

（2）1 阶矩等效温度。设 1 阶等效温度分布 $\bar{T}_1(x) = a_0 + a_1 x$，如图 2（b）所示，根据式（3）有

$$\begin{cases}\int_{-L/2}^{L/2}(a_0+a_1x)\,\mathrm{d}x=M_0\\ \int_{-L/2}^{L/2}(a_0+a_1x)\,x\mathrm{d}x=M_1\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}a_0=M_0/L\\ a_1=12M_1/L^3\end{cases}\tag{5}$$



(a) 0阶矩等效示意 (b) 1阶矩等效示意 (c) 2阶矩等效示意

图 2 各阶矩等效示意

Fig. 2 Diagram of moments equivalent

(3) 2 阶矩等效温度。设 2 阶等效温度分布 $\overline{T}_2(x)=a_0+a_1x+a_2x^2$,如图 2(c)所示,根据式(3)有

$$\begin{cases}\int_{-L/2}^{L/2}(a_0+a_1x+a_2x^2)\,\mathrm{d}x=M_0\\ \int_{-L/2}^{L/2}(a_0+a_1x+a_2x^2)\,x\mathrm{d}x=M_1\\ \int_{-L/2}^{L/2}(a_0+a_1x+a_2x^2)\,x^2\mathrm{d}x=M_2\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}a_0=9M_0/4L-15M_2/L^3\\ a_1=12M_1/L^3\\ a_2=180M_2/L^5-15M_0/L^3\end{cases}\tag{6}$$

(4) 3 阶矩等效温度。同理,设 3 阶等效温度分布 $\overline{T}_3(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3$,根据式(3)有

$$\begin{cases}a_0=9M_0/4L-15M_2/L^3\\ a_1=75M_1/L^3-420M_3/L^5\\ a_2=180M_2/L^5-15M_0/L^3\\ a_3=2\,800M_3/L^7-420M_1/L^5\end{cases}\tag{7}$$

显然,现有拱坝设计规范中坝体断面平均温度、线性等效温度的求解等价于矩法的 0 和 1 阶矩,两者是矩法等效的一个特例。

1.3 基于分布式光纤实测温度的拱坝温度荷载反馈

基于分布式光纤测温获得的典型水平截面的顺河向温度分布如图 3 所示,Δx 为相邻温度计测点间距。分析步骤为:①首先将顺河向实测温度分成若干段 Δx(Δx_1, Δx_2, …, Δx_n),基于实测温度计算获得 0 阶矩、1 阶矩、2 阶矩、3 阶矩等;②然后由式(4)~(7)计算获得等效温度各阶矩的系数;③最后绘制各阶矩随时间变化过程线,分析评价实际温度荷载的变化规律。

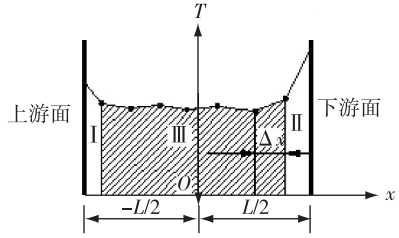


图 3 坝体断面测点温度分布示意

Fig. 3 Temperature distribution of dam sections

2 实例分析

为了较好地对溪洛渡特高拱坝混凝土进行通水冷却调控以及获得大坝混凝土的温度状态,选取 2 个典型河床坝段和 2 个典型岸坡坝段埋设分布式光纤进行温度监测。目前,溪洛渡特高拱坝处于蓄水期,上游水位保持在约 560 m,尚未达到正常蓄水位 600 m,坝体混凝土温度处于由封拱温度向准稳定温度场的动态调整过程中。

(1)由于现场施工条件较复杂,在施工期,采用上下游半仓交错方式埋设分布式测温光纤,并采用分布式光纤测温主机实时在线监测,其中测温主机的空间分辨率和采样间隔均设置为 0.5 m。采用矩法对 15#坝段典型 7#灌区的顺河向温度分布进行反馈,7#灌区有 3 个浇筑仓,每个浇筑仓厚 3 m,其中,7#灌区的实际封拱温度为 13.03 ℃,将该灌区的 3 个浇筑仓的实测温度合并在一起来描述全截面顺河向温度分布。

(2)基于矩法原理,采用式(1)计算分布式光纤顺河向实测温度相应的各阶矩,由拱坝温度荷载的定义,在计算时,将实测温度扣除封拱温度,然后计算获得相应的各阶矩。以 2014 年 2 月 21 日实际温度为例,表 1 中给出了顺河向实测温度及扣除封拱温度的实测温度。根据式(1),可得 $M_0 = 197.357\ 7$, $M_1 = -21.077\ 1$, $M_2 = 52\ 135.842\ 1$, $M_3 = 12\ 046.527\ 5$。采用同样的方法,可计算得到任意时刻该灌区顺河向实测温度分布的各阶矩。实际计算时,可编制程序快速计算获得各阶矩。扣除封拱温度后实际温度的各阶矩随时间变化过程线如图 4 所示。

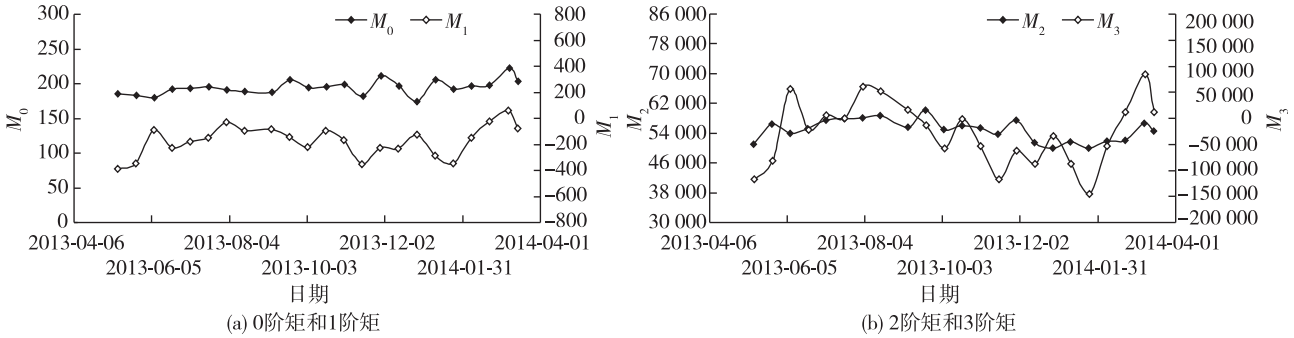
表 1　实测温度及各阶矩(2014-02-21)

Tab. 1　Measured temperature and moments (2014-02-21)

坐标 x/m	实测温度/℃	扣除封拱温度的温度/℃	坐标 x/m	实测温度/℃	扣除封拱温度的温度/℃
-27.45	15.34	2.310 0	8.45	16.28	3.250 0
-25.95	16.98	3.948 0	10.95	15.79	2.755 0
-23.45	17.18	4.154 0	13.45	16.44	3.413 0
-20.95	17.26	4.230 0	15.95	16.58	3.551 0
-18.45	17.01	3.983 0	18.45	16.36	3.334 0
-15.95	16.59	3.560 0	20.95	17.14	4.105 0
-13.45	16.48	3.446 0	23.45	17.26	4.229 0
-10.95	16.57	3.539 0	25.95	18.18	5.145 0
-8.45	16.55	3.523 0	27.45	14.40	1.370 0
0	16.42	3.386 5			

(3)假设分布式光纤顺河向实测温度的各阶矩和等效温度相应的各阶矩相等,由式(4)~(7)计算获得等效温度各阶矩的系数,由此获得等效温度的表达式。仍以 2014 年 2 月 21 日实际温度为例,将上述基于分布式光纤实测温度计算获得的各阶矩 M_0, M_1, M_2, M_3 代入式(4)~(7),可得到 0 阶、1 阶、2 阶和 3 阶等效温度表达式的系数:0 阶, $a_0 = 16.622\ 485$;1 阶: $a_0 = 16.622\ 485$, $a_1 = -0.001\ 528\ 53$;2 阶: $a_0 = 16.536\ 570$, $a_1 = -0.001\ 528\ 53$, $a_2 = 0.000\ 342\ 061$;3 阶: $a_0 = 16.536\ 570$, $a_1 = -0.019\ 698\ 3$; $a_2 = 0.000\ 342\ 061$, $a_3 = 4.018\ 95 \times 10^{-5}$。

(4)绘制实测温度的 0 阶、1 阶、2 阶、3 阶矩随时间变化过程线,同时绘制典型时刻等效温度分布图。例如,对于 7#灌区,扣除封拱温度的实际温度的各阶矩随时间变化过程线如图 4 所示,图 5 为 2014 年 2 月 21 日实测温度及各阶矩等效温度分布。



(a) 0阶矩和1阶矩　　(b) 2阶矩和3阶矩

图 4　实际温度各阶矩过程线

Fig. 4　Process line of actual temperature and moments

从实际温度的各阶矩历时过程线来看,0 阶矩历时过程线比较平稳,即坝体断面平均温度变化比较平稳;3 阶矩历时过程线波动较大。另外,从实际温度及各阶矩等效温度分布对比来看,2 阶、3 阶矩等效温度能更好地逼近坝体内部实际温度分布,反映坝体内部温度非线性分布的规律。随着蓄水至正常高水位运行,可以进一步获得坝段截面实际平均温度(0 阶矩)、线性温差(1 阶矩)与拱坝设计温度荷载的差异,以及坝段截面实际平均温度(0 阶矩)和线性温差(1 阶矩)达到稳定状态的时间等。通过获得坝体断面实际温度的 2 阶和 3 阶矩等效温度,更加全面地掌握高拱坝从封拱灌浆到水库正常运行期间坝体温度的调整过程。

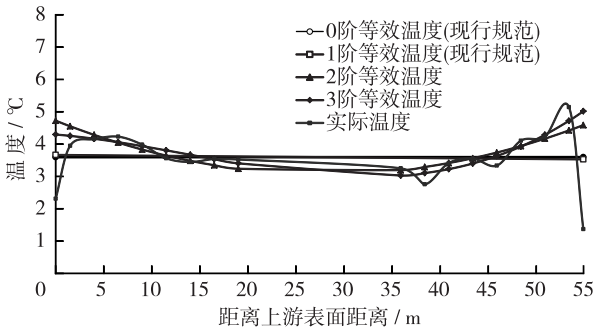


图 5 实际温度及各阶矩等效温度分布

Fig. 5 Actual temperature and equivalent temperature distribution of moments

3 结 语

针对现有规范采用的全截面线性化等效温度仅是非线性等效温度在一次矩等效时的特例,本文提出了基于矩法进行实际温度荷载反馈的方法,扩充了当前规范中采用线性化等效温度的概念。通过获得坝体断面实际温度的 2 阶和 3 阶矩等效温度,可以更加全面地掌握高拱坝从封拱灌浆到水库正常运行期间坝体温度的调整过程,可为拱坝设计提供有益的技术参考。

参 考 文 献:

[1] DL/T 5346—2006 混凝土拱坝设计规范[S]. (DL/T 5346—2006 Concrete arch dam design specifications[S]. (in Chinese))

[2] SL 282—2003 混凝土拱坝设计规范[S]. (SL 282—2003 Concrete arch dam design specifications[S]. (in Chinese))

[3] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (ZHU Bo-fang. Massive concrete temperature stress and temperature control[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))

[4] 朱伯芳. 拱坝温度荷载计算方法的改进[J]. 水利水电技术, 2006, 37(12): 19-22. (ZHU Bo-fang. Improvement of method for computing temperature loads on arch dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(12): 19-22. (in Chinese))

[5] 张国新, 陈培培, 周秋景. 特高拱坝真实温度荷载及对大坝工作性态的影响[J]. 水利学报, 2014(2): 127-134. (ZHANG Guo-xin, CHEN Pei-pei, ZHOU Qiu-jing. Real temperature load and the influence on the working performance of super-high arch dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(2): 127-134. (in Chinese))

[6] 黄耀英, 吴中如, 沈振中, 等. 改进的混凝土重力拱坝温度荷载分析[J]. 水力发电, 2007, 33(9): 16-19. (HUANG Yao-ying, WU Zhong-ru, SHEN Zhen-zhong, et al. Analysis of temperature load of improved concrete gravity arch dam[J]. Water Power, 2007, 33(9): 16-19. (in Chinese))

[7] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. (WU Zhong-ru. Hydraulic structures safety monitoring theory and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese))

[8] 蔡德所. 光纤传感技术在大坝工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (CAI De-suo. Optical fiber sensing technology in dam project[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002. (in Chinese))

[9] 戴会超, 蔡德所. 温度分布式及裂缝监测的光纤传感技术在三峡工程中的应用[J]. 水力发电, 2003(12): 59-61. (DAI Hui-chao, CAI De-suo. Application of temperature distribution and crack monitoring optical fiber sensing technology in the Three Gorges project[J]. Hydropower, 2003(12): 59-61. (in Chinese))

[10] 蔡德所, 戴会超, 蔡顺德, 等. 分布式光纤传感监测三峡大坝混凝土温度场试验研究[J]. 水利学报, 2003(5): 88-91. (CAI De-suo, DAI Hui-chao, CAI Sun-de, et al. Monitoring the temperature in concrete structure of Three Gorges dam by using distributed opptical fiber sensor[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(5): 88-91. (in Chinese))

[11] 周宜红, 周建兵, 黄耀英, 等. 基于分布式光纤的混凝土表面温度梯度监测试验及反馈研究[J]. 长江科学院院报,

2012，29(9)：42-45.（ZHOU Yi-hong，ZHOU Jian-bing，HUANG Yao-ying，et al. Monitoring of temperature gradient on concrete surface by distributed optical fiber and feedback analysis[J]. Yangtze River Scientific Research Institute，2012，29(9)：42-45.（in Chinese））

[12] 杨强，刘福深，周维垣. 基于矩法的重力坝建基面非线性等效应力分析[J]. 水力发电，2006，32(2)：23-25，55.（YANG Qiang，LIU Fu-shen，ZHOU Wei-yuan. Nonlinear equivalent stress analysis of base surface of gravitvity dam based on moment methods[J]. Hydropower，2006，32(2)：23-25，55.（in Chinese））

[13] 李平，何蕴龙，吴凤先. Hardfill 坝建基面的非线性等效应力分析[J]. 人民长江，2008，39(12)：16-18.（LI Ping，HE Yun-long，WU Feng-xian. The Hardfill dam foundation plane nonlinear equivalent stress analysis[J]. Yangtze River，2008，39(12)：16-18.（in Chinese））

Feedback analysis of actual temperature loads of high arch dam based on moment method

WEI Xiao-bin[1]，HUANG Yao-ying[2]，ZHAO Long[3]，WANG Xi-lin[1]

（1. *Bowen College*，*Lanzhou Jiaotong University*，*Lanzhou* 730100，*China*；2. *College of Hydraulic & Environmental Engineering*，*China Three Gorges University*，*Yichang* 443002，*China*；3. *Gansu Provincial Department of Water Resources*，*Lanzhou* 730100，*China*）

Abstract：Temperature load is one of the main design loads of the arch dam，which is closely related to closure grouting temperature and environment temperature and water temperature of reservoir. However，there are some differences between the actual temperature loads and the design temperature loads. As the traditional point thermometer monitoring data is far from enough，it is difficult to make reasonable and effective feedback of the arch dam temperature load. Combining with the measured temperature monitored by a distributed optical fiber placed on a typical dam section of the Xiluodu high arch dam，based on a moment method，the actual temperature load of the high arch dam got feedback. The equivalent temperature can be expressed by polynomial with the moment method. Based on the equivalence principle of moments of the equivalent temperature and the measured temperature given by the distributed optical fiber，the coefficients of the polynomial and distribution of the equivalent temperature can be obtained. Analysis results show that the whole cross-section of the equivalent linear temperature in the existing specifications is only a special case of the nonlinear equivalent temperature which is 1 moment. By calculating 2 and 3 moments equivalent temperature of the actual temperature and obtaining the nonlinear temperature distribution of the dam sections，the adjustment process of the arch dam temperature from the closure grouting to the normal operation can be more fully understood，and it can provide a useful supplement to the arch dam design.

Key words：moment method；high arch dam；temperature loads；distributed optical fiber for measuring temperature；feedback