

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.021

电磁式电流互感器误差矢量代数分析法^{*}

穆小星^{1,2}

(1. 国网江苏省电力公司 电力科学研究院, 江苏 南京 210019; 2. 国家电网公司 电能计量重点实验室, 江苏 南京 210019)

摘要:针对目前互感器相关参考书中电磁式 CT 误差模型采用向量几何法进行建模,存在的理论与逻辑性不强、结论模糊、表述不清晰等问题,通过电磁式互感器 CT 等效电路模型,依据电路及计量误差理论,采用矢量代数学分析方法建立了互感器复(数)误差数学模型;通过复(数)误差不同代数表达式,合理引申出互感器比差、角差理论公式,据此对电磁式 CT 误差特性及影响因素、运行条件下误差影响量及对电能计量产生的附加误差进行了定量系统分析。研究表明,矢量代数建模及分析法简单、严谨,逻辑性强,对电磁式 VT、VT 二次回路压降分析也同样适用,是对电磁式互感器误差理论的完善,也是互感器“低校高”误差间接测量法及计算机误差仿真的理论基础。

关键词:电流互感器误差;误差模型;CT;比差;角差;阻抗角;矢量代数分析

中图分类号:TM744

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1263-05

Vector algebraic analysis method for inductive current transformers error

MU Xiao-xing^{1,2}

(1. Jiangsu Electrical Power Company Research Institute, Nanjing 210019, China;

2. State Grid Key Laboratory of Electrical Power Metering, Nanjing 210019, China)

Abstract: Aiming at the problem of illogical theory, vague conclusion, and unclear expression in an electromagnetic CT error model based on vector geometry error modeling reported in literature, an complex error mathematic model for transformer was developed based on vector algebra analytic method by utilizing transformer CT equivalent circuit model and the theory on circuit & measurement error. Based on different algebra expressions for complex error, formula for the ratio difference and the angular difference of the transformer were rationally derived, the error characteristics and the influencing factors of the CT transformer, the error effect of the transformer operating state, and the additional error to the electric energy measurement were analyzed systematically and quantitatively. The results show that the vector algebra modeling and analytic method is a simple, rigorous, and logical method for transformer error analysis, and can be applied to voltage drop of the VT secondary circuit too. The proposed method, therefore, can enhance the error theory of electromagnetic transformer, and establish a theoretical basis for the indirect measuring method of calibrating high voltage transformers with low measuring voltage for computer simulations.

Key words: current transformer error; error model; CT; ratio difference; angular difference; impedance phase angle; vector algebraic analysis

0 引言

电磁式电流互感器(简称 CT)有其经典的电路模型、误差数学模型^[1],但在其相关参考书中^[2-3],相应误差的数学建模、分析都是借助于参数向量图通过几何分析法进行的。但通过分析后,认为向量图几何分析法在理论上有一定缺陷,误差建模不清晰,计算公式推导非常牵强,严谨性、逻辑性不强,甚至还有错误内容。这是因为几何分析法很难处理代数符号及数学四则运算问题,不能形成逻辑上的推理、演绎,存在先天

不足。此外这些文献中对误差的分析不够深入、全面,结合电能计量实际进行应用分析的内容则更少。

随着电能计量装置越来越受到电力供需双方的重视(关乎贸易结算),作为高压电能计量装置重要计量器具的电流、电压互感器日益被受到关注,其计量性能、误差特性、对电能计量影响也成为计量管理人员关注的焦点。其相应技术监督越来越受到加强,开展相关技术培训工作也越来越多。因此,面对以上情况,开展互感器误差理论及测试研究、创新及对互感器误差理论吐故纳新,适时澄清、理顺相关参考书中过时内容,完善互感器

收稿日期:2016-01-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477028)

作者简介:穆小星(1963-),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事电力计量测试及技术方面的研究. E-mail:m139129@163.com

误差理论,建立严谨科学的误差数学模型,并对电能误差影响进行分析,则具有非常的现实意义。

本研究将通过电参数矢量代数分析方法,结合电路理论及 CT 互感器等效电路模型,依据互感器误差定义,运用矢量代数数学分析方法,建立电磁式 CT 误差数学模型,并结合矢量数学不同的表达形式,通过相应公式,对 CT 互感器误差特性及影响因素、运行条件下误差影响量及对电能计量产生的附加误差进行系统的分析。

1 电磁式 CT 电路模型

电磁式 CT 电路模型如图(1)所示。

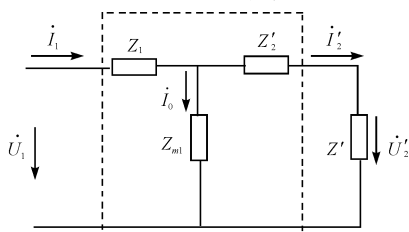


图 1 电磁式 CT 等效电路图

Z_1, Z_2 —一次、二次线圈阻抗, $Z_1 = R_1 + jx_1, Z_2 = R_2 + jx_2$;
 Z'_1 — Z_1 折算到二次的等效阻抗, $Z'_1 = Z_1/K_n^2$; Z'_2 — Z_2 折算到一次的等效线圈阻抗, $Z'_2 = K_n^2 Z_2$; Z, Z' ——二次负载阻抗及折算到一次阻抗, $Z' = K_n^2 Z$; Z_{m1} ——一次励磁阻抗

此为经典的 CT 互感器电路模型图(将 CT 二次回路折算到一次回路),是分析电磁式 CT 误差的理论基础。

2 电磁式 CT 误差数学模型

按减极性原则,电压、电流参考方向定义按图 1 所示,依据电路理论及矢量代数表示方法^[46],则有:

$$\Delta I = I'_2 - I_1 = -I_0$$

CT 复误差为:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta I}{I_1} = -\frac{I_0}{I_1} = -\frac{I_0}{I_0 + I'_2} \approx -\frac{I_0}{I'_2} = -\frac{Z' + Z'_2}{Z_{m1}} = -\frac{Z'_{o2}}{Z_{m1}} = -Y_{m1} Z'_{o2} = -Y_{m2} Z_{o2} \quad (1)$$

式(1)为一复数,其极坐标形式为:

$$\tilde{\varepsilon} = -|Y_{m2}| \angle -(90^\circ - \psi) |Z_{o2}| \angle \varphi = -|Y_{m2}| |Z_{o2}| \angle (\varphi + \psi - 90^\circ) \quad (2)$$

转换为直角坐标形式为:

$$\tilde{\varepsilon} = -|Y_{m2}| |Z_{o2}| \sin(\varphi + \psi) + j|Y_{m2}| |Z_{o2}| \cos(\varphi + \psi) = f + j\delta \quad (3)$$

依据电磁理论,在工频状态下复误差同相分量(比差)、正交分量(角差)可分别表示为:

$$\begin{cases} f = -|Y_{m2}| |Z_{o2}| \sin(\varphi + \psi) = -\frac{CL}{\mu N_2^2 S} |Z_{o2}| \sin(\varphi + \psi) \\ \delta = |Y_{m2}| |Z_{o2}| \cos(\varphi + \psi) = \frac{CL}{\mu N_2^2 S} |Z_{o2}| \cos(\varphi + \psi) \end{cases} \quad (4)$$

式(1)也可转换为代数表达式:

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon} &= -Y_{m2} Z_{o2} = -(G_{m2} + jB_{m2})(R_{o2} + jx_{o2}) = \\ &= -G_{m2} R_{o2} + B_{m2} x_{o2} + j(G_{m2} x_{o2} + B_{m2} R_{o2}) = \\ &= -G_{m2}(R_2 + Rz) + B_{m2}(x_2 + Xz) + \\ &= j[G_{m2}(x_2 + Xz) + B_{m2}(R_2 + Rz)] = \\ &= -G_{m2}(R_2 + |Z| \cos \varphi) + B_{m2}(x_2 + |Z| \sin \varphi) + \\ &= j[G_{m2}(x_2 + |Z| \sin \varphi) + B_{m2}(R_2 + |Z| \cos \varphi)] = \\ &= f + j\delta \end{aligned}$$

同理,复误差同相分量、正交分量可分别表示为:

$$\begin{aligned} f &= -G_{m2}(R_2 + |Z| \cos \varphi) + B_{m2}(x_2 + |Z| \sin \varphi) \\ \delta &= G_{m2}(x_2 + |Z| \sin \varphi) + B_{m2}(R_2 + |Z| \cos \varphi) \end{aligned} \quad (6)$$

式(1~6)中: $\tilde{\varepsilon}$ ——CT(复)误差; ψ ——磁滞角(铁芯损耗角); φ ——二次回路总的阻抗角; Z_{o2} ——二次回路总阻抗 $Z_{o2} = Z_2 + Z$; Y_{m2} ——二次绕组激磁导纳, $Y_{m2} = G_{m2} + jB_{m2}$; Z_2 ——二次绕组阻抗, $Z_2 = R_2 + jx_2$; Z ——外接二次负载, $Z = R_z + jX_z = |Z| \cos \varphi + j|Z| \sin \varphi$; f, δ ——CT 比差、角差; C ——误差常数,等于 4.5×10^5 ; L ——铁芯磁路平均长度; μ ——铁芯磁导率; S ——铁芯有效截面积; N_2 ——二次匝数。

3 电磁式 CT 误差特性分析

由上述误差数学模型可知:

(1) CT 误差为励磁电流与 CT 工作电流之比或二次线圈及外接阻抗与励磁阻抗之比(与励磁导纳之积)的负值,它是一个复数误差。该误差大小(复误差模)仅与激磁导纳、二次绕组及外接负载大小(含导线及回路接触电阻)有关,与一次绕组参数无直接关;而激磁导纳与 CT 工作电流、CT 本身铁芯结构、材料、二次绕组匝数有关。与材料相关的参数是磁导率,它与激磁电流相关且呈非线性关系。

(2) CT 复误差幅值(误差的模)为 $-|Y_{m2}| |Z_{o2}|$, 幅角为 $(\psi + \varphi - 90^\circ)$, 其实部即复数误差的同相分量,称比差;虚部即复数误差的正交分量,称角差。

(3) 所有阻抗角(励磁、二次绕组、二次负载)不影响误差(复误差的模)的大小,只影响复误差幅角,即影响在 x, y 轴上的投影大小(绝对值)和方向,也即比差、角差大小及符号(正负)。改变外接二次负载阻抗角的大小可以改变比差、角差分配比例(正比或反比,依阻抗性质定)和正负。在没有补偿情况下,二次阻抗角小于 $-\Psi$ 时比差恒为正,其余则恒为负;二次阻抗角小于 $(90^\circ - \Psi)$ 则角差恒为正,其余则恒为负。也即有:当二次负载为感性时比差恒为负值、为容性时可负($-\Psi \sim 0$)可正($< -\Psi$);当二次负载为容性时角差恒为正值、为感性时可正($0 \sim (90^\circ - \Psi)$)可负($> (90^\circ - \Psi)$)。

(4) 当二次负载不变, CT 误差(比、角差)与励磁阻抗成反比关系;由 CT 磁化曲线(伏安曲线)特性可知,在额定电流值低段和高段,磁导率(励磁阻抗)较小,所以此时 CT 误差(比、角差)较大,在中间段磁导率(励磁阻抗)大,则误差小。故 CT 误差随一次电流的变化也为非线性,一次电流在 $(0 \sim I_n)\%$ 之间变化时,CT 误差亦随之变化,呈现为一条曲线(双曲线),如图 2 所示。

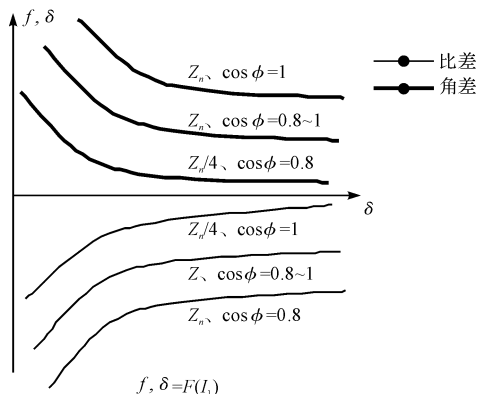


图 2 电磁式 CT 误差—电流典型曲线(非补偿)

(5) 任一电流、任一功率因数角下,CT 比差、角差基本上是二次负载阻抗值的一次线性函数:

$$\begin{aligned} f &= k_1 |Z_{02}| \\ \delta &= k_2 |Z_{02}| \end{aligned} \quad (7)$$

$$k_1 = -|Ym2| \sin(\varphi + \psi), k_2 = |Ym2| \cos(\varphi + \psi)$$

(6) 任一电流下,当二次负载阻抗值不变,仅阻抗角(功率因数角)变化时,CT 比差、角差分别是二次负载阻抗角的正余弦函数:相位是阻抗角,初相位是磁滞角,幅值是二次阻抗值与励磁阻抗值之比。阻抗大或一次电流小,则曲线峰值高;阻抗小或一次电流大(小于额定值)则曲线峰值低:

$$\begin{aligned} f &= -A \sin(\varphi + \psi) \\ \delta_f &= A \cos(\varphi + \psi) \end{aligned} \quad (8)$$

$(A = |Ym2| |Z_{02}|)$ 。

4 电磁式 CT 误差影响量分析

对于现场应用的电磁式 CT,其本身参数、性能在出厂时已经固定,在其工作点,可以认为 CT 应用误差仅是二次绕组外接负载的函数。对其应用误差的分析,具有一定的实际意义。

4.1 阻抗大小对误差影响(阻抗角不变)

由公式(8)可知,在额定工作电流范围内,比、角差基本上是二次阻抗值的一次线性函数,误差图形近似为直线,电磁式 CT 误差负载曲线(非补偿)如图 3 所示。

从图 3 可知,依二次负载阻抗角的不同,误差线向

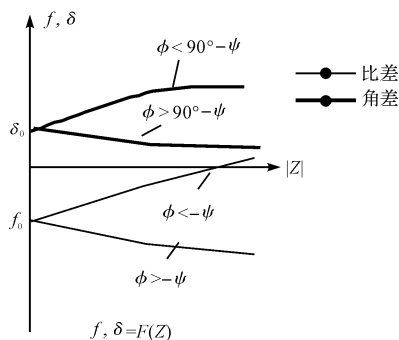


图 3 电磁式 CT 误差—负载曲线(非补偿)

不同方向发散。阻抗角决定了斜率的正负(直线的辐射方向)及大小,二次绕组阻抗值决定了曲线(近似直线)的起点。

4.2 二次负载阻抗(功率因数)角对负载误差影响

由公式(12)可知,比、角差是二次负载阻抗角的正余弦函数,误差曲线为正弦曲线,CT 误差阻抗角曲线图如图 4 所示。

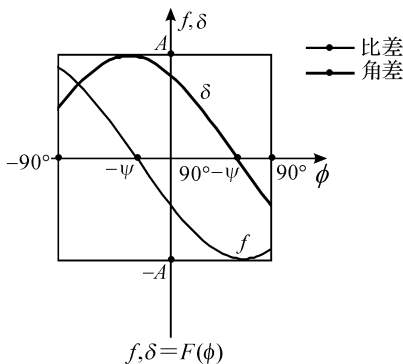


图 4 CT 误差阻抗角曲线图

依上图可知,阻抗角有两个重要分界点:角差分界点“ $90^\circ - \Psi$ ”,比差分界点“ $-\Psi$ ”。

(1) 对于角差:

① $\varphi = (90^\circ - \Psi): \delta = 0$, 角差分量最小;

② $\varphi > (90^\circ - \Psi): \delta < 0$, $\varphi = 90^\circ$ 时,为负最大 $(-A \sin \Psi)$;

③ $\varphi < (90^\circ - \Psi): \delta > 0$, $\varphi = -\Psi$ 时,为正最大 (A) 。

(2) 对于比差:

① $\varphi = -\Psi: f = 0$, 比差分量最小;

② $\varphi < -\Psi: f > 0$, $\varphi = -90^\circ$ 时,为正最大 $(A \cos \Psi)$;

③ $\varphi > -\Psi: f < 0$, $\varphi = 90^\circ - \Psi$ 时,为负最大 $(-A)$ 。

以上是 CT 负载误差的特性的理论分析,最终比差、角差的正负决定于 CT 内部补偿情况。电磁式 CT 二次端应工作在额定负载及额定功率因数范围内,否则整个 CT 精度难以保证。合理选择、配置二次工作负载,使电磁式 CT 工作在最小误差状态。通过上述曲线及误差模型,对各种影响量都可以直观地进行分析。

5 CT 误差的测量(算)

CT 误差与二次回路总阻抗有关,二次绕组的阻抗是固定的,可变的是二次绕组的外接阻抗。CT 误差测量有直接法和间接法^[7]。直接法就是被测互感器与同变比标准互感器比较(平衡或差值比较法)从而得出被测互感器得误差;间接法就是依据上述误差数学模型及电磁测量基础,通过间接测量互感器相关参数,再通过计算得出互感器误差^[8-9]。在检定互感器时,依据检定规程,应分别在二次侧接入(或设定)额定负荷及下限负荷,分别测量(或计算)其误差,依次判断互感器计量性能合格否。

然而有时研究者还需要测算互感器在现场实际二次负荷情况下误差^[10],以便估算在其运行状态下其本身误差对电能产生的综合误差^[11]。但对电能计量装置还不能在实际负荷下直接测量 CT 误差(影响电能表读数),因此事先测量或了解互感器实际负载就成为必要,再通过上述误差模型就能推算实际负荷下 CT 误差(鉴于篇幅,省略)。因此对于互感器使用者和计量装置的设计者,有必要对 CT 回路阻抗计算给予充分了解。在分析 CT 误差时,二次负载为外接负载阻抗、回路导线电阻、接触电阻的串联总阻抗值。

(1) 单相回路及三相回路中 CT 回路采用分相接法阻抗的计算:此种情况下二次绕组组成的回路是独立的,阻抗即该回路导线电阻、接触电阻及其所接负载之和。

$$Z = R_k + 2R_L + Z_f \quad (10)$$

(2) 三相三线制中 CT 回路二相星形接法阻抗计算:

$$Z = R_k + \sqrt{3}R_L e^{j30^\circ} + Z_f \quad (11)$$

(3) 三相四线制中 CT 回路三相星形接法(电流平衡)阻抗计算:

$$Z = R_k + R_L + Z_f \quad (12)$$

式中: R_k, R_L, Z_f —回路接触电阻、导线电阻、二次工作负载阻抗,其公式可根据回路接法及相应电路图导出。

从上述计算式可以看出,在考虑互感器绕组外接负载时,不能仅仅考虑二次工作负载阻抗,还应充分考虑导线及接触电阻所占“份量”。上述公式是估算回路阻抗的依据,实际上回路阻抗更多通过现场在线测量得出。

6 CT 误差对电能计量附加误差影响计算

CT 误差引起的电能计量附加误差,通过下述公式表述:

(1) 单相电气系统:

$$\varepsilon_p = f_I + 0.029 \, 1 \delta_I \lg \varphi \quad (13)$$

(2) 三相四线制电气系统:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{3}[(f_{Ia} + f_{Ib} + f_{Ic}) + 0.029 \, 1(\delta_{Ia} + \delta_{Ib} + \delta_{Ic}) \lg \varphi] = \bar{f}_I + 0.029 \, 1 \bar{\delta}_I \lg \varphi \quad (14)$$

(3) 三相三线制电气系统:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{2}(f_{Ic} + f_{Ia}) + 0.289(f_{Ic} - f_{Ia}) \lg \varphi - 0.008 \, 4(\delta_{Ic} - \delta_{Ia}) + 0.014 \, 5(\delta_{Ic} + \delta_{Ia}) \lg \varphi \quad (15)$$

以上公式依据功率及误差公式可以得出。需说明的是,这里的 φ 是一次线路的功率因数角,非二次负载阻抗角。可以看出,当线路功率因数为 1 时(一般都接近), $\lg \varphi = 0$,对单相及三相四线制电气系统,电能误差仅与比差有关,如果在此工作状态下合理调整二次负载阻抗角,使比差小、角差大,则此时电能计量装置综合误差就会减小。而对三相三线制电气系统,不仅二次回路阻抗计算烦琐,而且其电能误差分析也烦琐,因此,对于三相系统的电能计量,若采用三相四线制计量方式,则无论是对电能计量影响还是误差计算、分析都有突出优点。

7 结束语

依据电磁式 CT 电路模型通过矢量代数分析法对电磁式 CT 误差给出一种新的建模及分析法,是对电磁式 CT 误差理论的一种完善,较之相关文献复杂的误差建模方法简单、严谨,逻辑性强,并由此使广大电能计量技术人员对电磁式 CT 误差的认知更加清晰。该建模、分析方法对电磁式电压互感器误差、电压互感器二次回路压降分析也同样适用,它们间仅电路模型不同而已。互感器误差矢量代数是互感器误差间接测量模型的技术基础,目前国内外互感器误差“低校高”测试方法及设备,其测量原理正是基于上述误差模型,通过间接测试被测互感器低压侧及所带负载相应参数,再通过误差模型计算被测互感器误差。这避免了采用大型电气试验装置费力费神且并不安全的传统测试方法的弊端,同时也使得互感器误差测量更加高效、便捷。

当前,信息化、智能化技术应用日益普及,若以误差模型为基础,开发相应仿真、分析软件,对互感器运行工作状态及各种条件下互感器误差、电能影响量进行仿真分析^[12],则将使互感器误差的理论研究提升到一个新的高度。

参考文献(References):

- [1] GB 1206—2006. 电磁式电流互感器[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

- [2] 赵修民. 电流互感器[M]. 太原:山西科学教育出版社, 1987.
- [3] 梁德政. 电能计量手册[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1990.
- [4] GB 2900. 74. 2008 电工术语 电路理论. [S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [5] 邱光源. 电路[M]. 北京:人民教育出版社, 1982.
- [6] 天津大学. 高等数学(中册)[M]. 北京:人民教育出版社, 1980.
- [7] 赵玉富, 林玉涵, 杨乃贵, 陈耀高等. 500 kV 电流互感器误差小信号测试设备的研制[J]. 电测与仪表, 2014, 51(6): 85-91.
- [8] 吕志强, 田 勇, 路夏甲, 等. 现场电流互感器误差测试间接检定法的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014, 44(6): 79-81, 103.
- [9] 曹团结, 张 剑, 尹项根, 等. 电流互感器的误差分析与工程计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 53-56.
- [10] 糜坚平, 周力任, 秦 毅. 一种确定电流互感器在任意负荷下的误差计算方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(11): 6-9.
- [11] 陈黎来. 电流互感器对电能计量的影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 138-141
- [12] LUCAS J R, MCLAREN P G, KEERTHIPALA W W L, et al. Improved simulation models for current and voltage transformers in relay study[J]. **IEEE Trans on Power Delivery**, 1992, 7(1): 152-159.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

穆小星. 电磁式电流互感器误差矢量代数分析法[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1263 - 1267.

MU Xiao-xing. Vector algebraic analysis method for inductive current transformers error[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(10): 1263 - 1267.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1216 页)

综上所述,本研究的设计方案在合成气压缩机驱动领域有良好的应用性能,在应用途径上,它符合大型化工装置关键设备国产化的政策导向,可以替代市场上的国外同类型产品。

参考文献(References):

- [1] IKENO K. Application of advanced integral shrouded blades to high-speed and high-power mechanical drive steam turbines[J]. **MHI Technical Review**, 2004, 41(3): 154-158.
- [2] IWATA K. Development of 500mm long blade for variable-speed, high-loading mechanical drive steam turbine [J]. **MHI Technical Review**, 2004, 41(3): 130-134.
- [3] 屈焕成, 张 荻, 谢永慧, 等. 汽轮机调节级非定常流动的数值模拟及气流激振力研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(11): 39-44.
- [4] 屈焕成, 张 荻, 蓝吉兵, 等. 汽轮机调节级三维复杂流动的数值研究[J]. 热科学与技术, 2011, 10(1): 82-87.
- [5] 谢永慧, 蓝吉兵, 樊 涛. 透平级三维粘性非定常流动及气流激振力研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 78-84.
- [6] 徐志明, 孔建强, 丁旭东. 驱动合成气压缩机用汽轮机气流激振与对策[J]. 热力透平, 2008, 37(1): 30-34.
- [7] 蓝吉兵, 丁旭东, 陈金铨, 等. 高参数高转速工业汽轮机转子稳定性评估[J]. 热力透平, 2015, 44(1): 7-9.
- [8] 曹 栋. 大型化工装置离心式合成气压缩机功能结构分析[J]. 泸天化科技, 2007(2): 143-148.
- [9] 魏宇桑. 合成气压缩机驱动汽轮机改造[J]. 大氮肥, 2001, 24(6): 412-413.
- [10] 方 寅, 孙 烈, 张 科, 等. 年产百万吨乙烯装置裂解气压缩机用汽轮机的研制[J]. 机电工程, 2012, 29(10): 1154-1158.
- [11] American Petroleum Institute. API612-2005, Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries-Steam Turbines-Special-Purpose Applications [S]. Washington: American Petroleum Institute, 2005.
- [12] 蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2006.
- [13] 汪宽华, 潘志贤, 郑飞逸, 等. 汽轮机叶片断裂原因分析研究[J]. 机电工程, 2014, 31(12): 1600-1603.
- [14] 宋 灿, 吕彦明, 魏中兴. 基于透平叶片精度分析的计算机辅助夹具系统设计[J]. 液压气动与密封, 2015, 35(2): 26-28.
- [15] 吴厚钰. 透平零件结构和强度计算[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007.
- [16] 史进渊, 杨 宇, 邓志成, 等. 汽轮机零部件强度有限元分析的设计判据[J]. 热力透平, 2011, 40(1): 22-27.
- [17] W. 特劳佩尔. 热力透平机(特性与结构强度)[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [18] 钟一谔, 何衍宗. 转子动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1984.
- [19] 美国全国电气制造商协会. NEMA SM23-1991, 机械驱动用汽轮机[S]. 弗吉尼亚州罗斯林:美国全国电气制造商协会, 1991.

[编辑:李 辉]