

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.007

我国水工液压启闭机稳定计算方法及存在问题

刘旭辉¹,周建方²,任红²

(1.浙江省水利水电勘测设计院,浙江 杭州 310002; 2. 淮海大学 机电工程学院,江苏 常州 213022)

摘要: 针对我国目前计算水工液压启闭机稳定性的方法各不相同的情况,进行了系统的梳理、总结,归纳成等截面法、高登·兰金公式、稳定系数法、折算长度法四种方法,指出了每种方法的出处和优缺点;并通过一具体算例,对每种方法的计算结果进行了比较,从而为设计人员正确使用各种方法提供了方向,也为今后统一计算方法提供了基础。

关键词: 水工液压启闭机;稳定性;稳定系数法;折算长度法

中图分类号: TV664.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2017)05—0039—05

Methods and Problems of Stability Calculation of Hydraulic Hoist in China

LIU Xuhui¹, ZHOU Jianfang², REN Hong²

(1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydroelectric Power, Hangzhou, Zhejiang 310002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

Abstract: According to the stability calculation of hydraulic hoist in China, the different methods are sorted out systematically and summarized into the equal section method, Gordon Rankine formula, stability coefficient method and equivalent length method. And the advantages and disadvantages of each method are discussed. The calculation results of each method are compared through an example, which gives a way for the designers to apply various methods correctly and provide some references for further unifying calculation method.

Keywords: hydraulic hoist; stability; stability coefficient method; equivalent length method

水利水电工程中液压启闭机的应用愈来愈广泛,作为液压启闭机的关键部件的液压缸,其工作的可靠性和安全性直接关系到启闭机乃至水工建筑物的可靠和安全,因此液压缸的稳定性也受到越来越广泛的重视。但是,我国对水工液压缸的稳定性虽然有一些研究^[1-4],但总体上不够系统、深入,尤其在相应的设计规范、设计手册和教材^[5-10]中,所使用的方法也不尽相同,给设计人员带来了困惑和麻烦。因此,本文对此作一系统总结、梳理,指出每种方法的优缺点,并为今后的研究提供基础。

在下面的讨论中,均认为是液压缸的最大安装长度 $L \geq 10 d$ (活塞杆直径),即需进行稳定性计算的情况。

1 等截面法

该方法在稳定验算时,将缸体和活塞杆看作是固接在一起的截面相同的杆件,把液压缸全伸状态最大安装长度作为计算长度,按等截面压杆公式计算得到临界载荷。该方法出自于教材《水工起重机械》^[10],具体为:

(1) 当 $\lambda > \lambda_1$,按欧拉公式计算临界力:

$$P_{cr} = \frac{\pi EI_1}{(\mu L)^2} \quad (1)$$

(2) 当 $\lambda_1 > \lambda > \lambda_2$ 时,采用直线经验公式:

$$P_{cr} = 0.1A(a - b\lambda) \quad (2)$$

式中: λ 为计算柔度; λ_1, λ_2 为对应材料比例极限和

收稿日期:2017-05-20

修稿日期:2017-06-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51679075)

作者简介:刘旭辉(1970—),男,浙江杭州人,教授级高级工程师,主要从事水工金属结构研究。E-mail: lxh1118@163.com

通信作者:周建方(1961—),男,江苏常州人,博士,教授,主要从事工程力学和水工金属结构研究。E-mail: zhoujif101@163.com

屈服极限的柔度值; L 为工作时液压缸最大安装长度; μ 为由安装形式决定的长度系数; E 为活塞杆材料纵向弹性模量; I_1 为活塞杆截面惯性矩; A 为活塞杆截面积; a, b 为与材料有关的常数。

事实上,上述方法为材料力学教材中常使用的方法,即对细长杆采用欧拉公式,对中长杆采用直线公式,所使用的常数也与《材料力学》^[11]教材中的基本相同。

当进行稳定性校核时,安全系数一般取 2~4。

很显然,把缸体看作和活塞杆固接在一起的等截面杆来计算临界载荷虽然方法简单,但与实际情况相差较大。

2 高登·兰金公式

该方法在进行液压缸的稳定性计算时,也是将缸体和活塞杆看作固接在一起截面相同的杆件,把液压缸全伸状态最大安装长度作为计算长度,按等截面压杆计算得到临界载荷,与上节不同的是对于中长杆采用高登·兰金公式计算,该方法为《水电站机电设计手册》^[9]所采用。此手册是为适应我国水利水电建设事业发展的要求,20 世纪 80 年代由当时的水电部水利水电规划设计院组织有关单位在总结经验和吸收新技术的基础上编写的,在全国影响较大。从手册所采用的材料常数来看,该方法引用于日本的《油缸》^[12]一书,具体为(这里仅考虑两端铰支情况):

(1) 当 $\lambda \geq m$ (这里的一些符号采用原来的, m 相当于比例柔度 λ_1) 时,按欧拉公式(1) 计算临界载荷;

(2) 当 $\lambda < m$ 时,按高登·兰金公式计算:

$$P_{cr} = \frac{f_c A}{1 + k\mu^2 \left(\frac{L}{i}\right)^2} \quad (3)$$

(3) 当 $\lambda < 20$ 时,作为压缩构件考虑。

上式中: m, f_c, k 为由材料决定的实验常数,见表 1; i 为活塞杆惯性半径,其余同上。

表 1 兰金公式中的材料常数 f_c, k, m

材料类别	f_c	k	m
铸铁	5600	1/1600	80
软钢	3400	1/7500	90
硬钢	4900	1/5000	85
锻钢	2500	1/9000	110

该方法相对来说计算也比较简单,但存在以下问题:

(1) 与上相同,将缸体和活塞杆看成等截面,不符合实际情况。

(2) 给出的材料常数太笼统,没有我们常见材料的材料常数,公式很难应用;而且表 1 所给出的 m 值与等截面法中的 λ_1 也相差较大。

(3) 更主要的,经过计算发现,在分界点由欧拉公式和兰金公式计算得到的临界载荷不相等,对于硬钢,相差 30%。为了形象说明这个问题,将由式(1)、式(2)、式(3)得到的临界应力总图绘于图 1,由图 1 可以看出直线公式不存在这个问题,且兰金公式得到的临界载荷小于直线公式,偏保守。进行稳定性计算时,手册中要求安全系数取 6 以上,更是偏于保守。

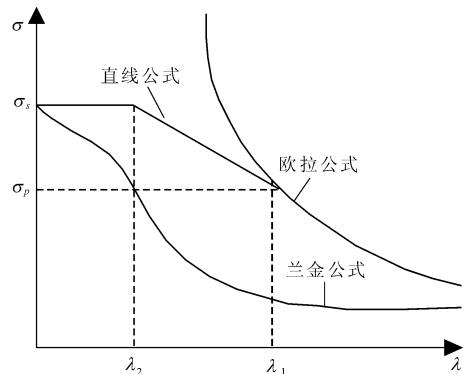


图 1 临界应力总图

3 稳定系数法

该方法根据液压缸在工程中的具体安装形式和受力情况,采用不同的稳定系数进行稳定计算。该方法为我国第一本《水利水电工程启闭机设计规范》^[5](SL 41—93)所采用,随后由于我国水利水电行业体制改革,分别修订出版了《水电水利工程启闭机设计规范》^[6](DL/T 5167—2002)和《水利水电工程启闭机设计规范》^[7](SL 41—2011)这两本规范,但在稳定性计算方面均没有作改变。具体为:

(1) 双作用液压缸安装在刚性支座上,闸门无侧向位移(见图 2),活塞杆只承受拉、压力,按式(4)进行稳定性计算:

$$\sigma = \frac{4P}{\varphi\pi d^2} \quad (4)$$

式中: φ 为稳定系数,规范中叫纵向弯曲系数,根据 λ 查得; P 为活塞杆的压力。

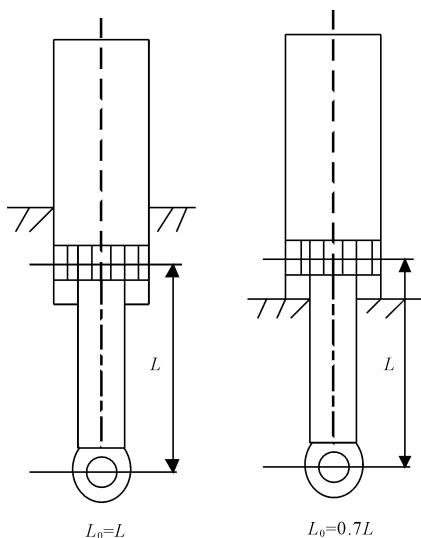


图 2 活塞杆折算长度计算简图

(2) 双作用液压缸安装在转动支座上的活塞杆计算。活塞杆承受拉(压)力和弯矩,计算简图见图 3,按式(5)进行稳定性计算:

$$\sigma = \frac{4P}{\varphi' \pi d^2} \quad (5)$$

式中: φ' 为稳定纵向弯曲系数,规范中叫纵向弯曲时的允许应力折减系数,根据条件柔度 λ_1 及折算偏心率查相应的表,这里由于篇幅所限不列出。

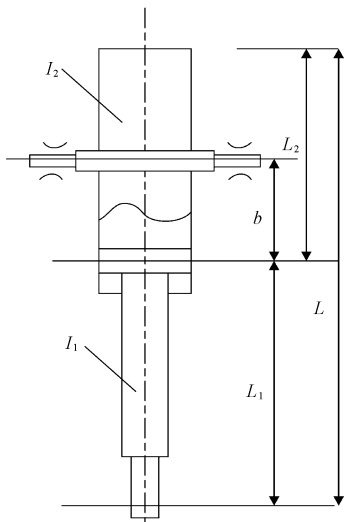


图 3 双作用油缸转动支座计算简图

对于双作用液压缸安装在刚性支座上,闸门发生侧向位移时也按式(5)进行稳定性计算。

当计算条件柔度 λ_1 时,必须确定变截面段 $L_1 + b$ 的计算长度 L_0 ,规范中规定为:

当 $0 \leq b \leq 0.4 \text{ m}$ 时:

$$L_0 = L_1 + b \quad (6)$$

当 $b > 0.4 \text{ m}$ 时:

$$L_0 = \mu_1 L \quad (7)$$

其中,长度折算系数 μ_1

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{I_1 + I_2}{2I_2}} \quad (8)$$

I_1 和 I_2 分别是活塞杆和缸体截面的惯性矩。

很显然,上面确定计算长度的方法是有问题的,首先是在 $b = 0.4 \text{ m}$ 处,用式(6)和式(7)得到的计算长度是不相等的;其次,长度折算系数 μ_1 与液压缸尺寸长度无关,显然不合理。有关这方面的问题我们将会另文详细讨论。

事实上,式(4)、式(5)的形式与我国 74 版的《钢结构设计规范》^[13](JT 17—74)中的轴心受压和偏心受压稳定性计算公式是一样的,但具体的 φ 、 φ' 值不一样, φ' 值的确定方式也有所不同。经过查阅(在 93 版的规范^[5]条文说明中也有所表述),发现这个方法和 φ 、 φ' 值出自于前苏联的《水工建筑物的启闭机械》^[14]一书,因此实际上规范中有关液压启闭机稳定性计算方法是参照《水工建筑物的启闭机械》而制订的。

其安全系数,在三本规范中没有明确说明,但通常稳定安全系数应高于强度安全系数。虽然启闭机规范中的 φ 值与我国钢结构规范中的值不一样,但相差并不大,按照我国相关规定,一般对钢压杆稳定安全系数取 1.8~3.0,因此可认为其稳定安全系数隐含为 1.8~3.0。

非常遗憾的是,至目前为止,规范^[6-7]所用的液压启闭机稳定性计算方法既不与我国同时期的钢结构设计规范相一致,也不与《起重机设计规范》^[15](GB 3811—83)相衔接,且在计算长度确定上还存在一定的问,因此有必要作进一步的研究。

另外需要说明的是,在规范^[6-7]的结构一章中,对其它构件的稳定性计算作了规定:

(1) 轴心受压构件除应满足强度、刚度条件外,尚应验算整体稳定和局部稳定。但仅作了笼统的要求,没有给出具体公式。

(2) 双向或单向压弯构件,则在附录中给出了具体计算公式,但与式(5)形式完全不一样。

同一本规范,对相同的受力形式,作不同的要求,给出不同的计算公式,似不妥,现在所使用的《起重机设计规范》^[16](GB/T 3811—2008)中就不存在这样的情况。

4 折算长度法

由于液压启闭机在水电水利工程中应用越来越

广泛,所以水电水利规划设计总院于 2013 年在原来《水电水利工程启闭机设计规范》^[6](DL/T 5167—2002)的基础上,将有关液压启闭机部分的内容进行修订后,成为独立的《水电水利工程液压启闭机设计规范》^[8](NB/T 35020—2013)。在该规范中对油缸的稳定性计算又采用了欧拉公式和直线公式,但与文献[10]不同的是,通过引入计算长度折减系数,考虑了变截面,具体为:

压杆计算长度

$$L_0 = \mu_0 \mu L \quad (9)$$

其中 μ_0 为计算长度折减系数

$$\mu_0 = \frac{L - L_1}{L} \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} + \frac{L_1}{L} \quad (10)$$

式中其它符号的含义见图 4 和前面的说明。

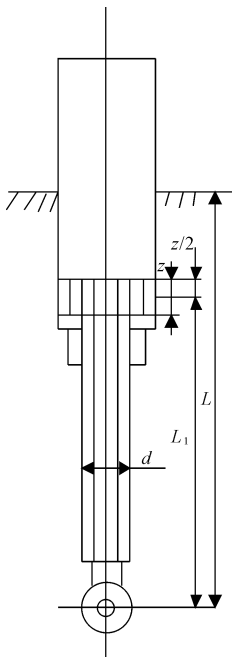


图 4 立式液压缸固定安装时活塞杆计算简图

液压缸的总成柔度为:

$$\lambda = \frac{4L_0}{d} \quad (11)$$

若 $\lambda \geq \lambda_1$, 则按欧拉公式计算临界载荷;若 $\lambda < \lambda_1$, 则按直线公式计算临界载荷。

规定的安全系数为 3.5 以上。

很显然,这里通过引入长度折减系数来考虑变截面,肯定比文献[10]合理,且长度折减系数计算公式(10)由于考虑了液压缸长度尺寸,比式(8)也更合理。压杆计算长度公式(9)也采用了规范^[16]中的形式,通过 μ 来反映两端约束情况,通过 μ_0 来考虑变截面,因此相对来说也是比较合理的。但是经过进

一步分析可发现,上述做法在有些情况下,误差还是较大的,具体我们将另文讨论。另外,在这个规范中,没有考虑偏心受压(或压弯),全按轴心受压验算稳定性,这也是不合适的。

当应用直线公式时,规范仅给出材料为 45 号钢和 Q345B 时的材料常数 $a = 335 \text{ MPa}$, $b = 0.62 \text{ MPa}$, 并说明活塞杆采用其他材料时 a 、 b 值参见材料力学相关章节。然而,按照材料力学教材^[11]45 号钢的 $a = 461 \text{ MPa}$, $b = 2.568 \text{ MPa}$, 两者相差较大。

5 小结和算例

上面对我国目前各种计算液压启闭机稳定性的方法进行了介绍和分析,指出了各种方法存在的问题。为便于比较,现从计算公式、截面处理、受力处理、安全系数四方面将 4 种方法对比结果见表 2。

表 2 各种方法比较

资料来源	计算公式	截面处理	受力处理	安全系数
文献[10]	欧拉公式、直线公式	等截面	轴心受压	2.0~4.0
文献[9]	欧拉公式、兰金公式	等截面	轴心受压	≥ 6.0
文献[5-7]	$\sigma = \frac{4P}{\varphi \pi d^2}$ 、 $\sigma = \frac{4P}{\varphi' \pi d^2}$	等截面	轴心受压、偏心受压	1.8~3.0
文献[8]	欧拉公式、直线公式	等截面	轴心受压	≥ 3.5

由表 2 可以看出,它们之间的差异还是很大的。下面通过一算例来进一步说明它们之间的差别。

算例 液压缸简化计算模型如图 3 所示,两端铰支,材料 45 号钢, $\sigma_s = 350 \text{ MPa}$, $\sigma_p = 280 \text{ MPa}$, 具体尺寸见表 3。现分别用四种方法计算稳定性。

表 3 液压缸基本参数表

L_1 /mm	L_2 /mm	d /mm	d_1 /mm	d_2 /mm	铰点距离 b /mm
2600	2400	160	200	300	400

注: d 为活塞杆直径; d_1 为缸筒内径; d_2 为缸筒外径。

$$(1) \lambda = \frac{4 \times (2600 + 400)}{160} = 75$$

由 σ_p 、 σ_s 可求得 $\lambda_1 = 86$ 、 $\lambda_2 = 43.2$, 所以必须用直线公式计算临界荷载,采用材料力学教材^[11]中的常数 $a = 461 \text{ MPa}$, $b = 2.568 \text{ MPa}$, 从而可得:

$$P_{cr} = (461 - 2.568 \times 75) \times \frac{\pi \times 160^2}{4} = 5996.6 \text{ kN}$$

(2) λ 值与上相同,用高登·兰金公式计算。表 1 中没有相应的材料常数,但手册^[9]中明确对钢取 $f_c = 4900$, $k = 1/5000$, 即对应表 1 中的硬钢;可从 45 号钢的屈服极限看,它更应该接近于表 1 中的软钢,

所以这里对两种情况都进行了计算,以作比较。

硬钢: $P_{cr} = 4633.9 \text{ kN}$

软钢: $P_{cr} = 3904.6 \text{ kN}$

(3) 因为 $b = 0.4 \text{ m}$ 为确定计算长度的分界点,须分别用式(6)和式(7)计算。

① 由式(6)得 $L_0 = 3000 \text{ mm}, \lambda = 75$

同样,由于没有45号钢的纵向弯曲系数。按照现行《钢结构设计规范》^[17](GBJ 17—2003),不同钢种可按式(11)对柔度进行修正,然后再查Q235的纵向弯曲系数:

$$\lambda_0 = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_s}{235}} \quad (11)$$

这里按这样的方法计算,得 $\lambda_0 = 91.5$,查表得 $\varphi = 0.67$,从而得许用荷载:

$$[P] = \varphi A [\sigma] = 0.67 A \frac{350}{1.5} = 3141.7 \text{ kN}$$

这里强度安全系数取1.5。

$$\textcircled{2} \text{ 由式(8)} \quad \mu_1 = \sqrt{\frac{I_1 + I_2}{2I_2}} = 0.74$$

由式(6) $L_0 = 2220 \text{ mm}$

从而 $\lambda = 55.6, \lambda_0 = 67.9$

查得 $\varphi = 0.6780$

从而 $[P] = 3751.3 \text{ kN}$

(4) 由式(10)

$$\mu_0 = \frac{L - L_1}{L} \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} + \frac{L_1}{L} = 0.91$$

从而 $\lambda = 68.3$

根据规范^[8]规定, $a = 335 \text{ MPa}, b = 0.62 \text{ MPa}$,从而得临界荷载:

$$P_{cr} = (a - b\lambda)A = 5881.2 \text{ kN}$$

为便于比较,将上述结果列于表4中。从表4中可以看出对于同一个液压缸采用不同的方法计算得到的许用荷载相差很大,这将造成工程人员在设计时无所适从,同时有时会产生很大的材料浪费。

表4 液压缸几种计算方法下的许用(临界)荷载

资料来源	临界荷载 P_{cr}/kN	安全系数 n	许用荷载 $[P]/\text{kN}$
文献[10]	5996.6	2.0~4.0	2998.3~1499.2
文献[9]	3904.6~4633.9	≥ 6.0	650.8~772.3
文献[5~7]		1.8~3.0	3141.7~3751.3
文献[8]	5881.2	≥ 3.5	1680.3

6 结 语

本文对我国目前水工液压启闭机的稳定性计算

方法进行了总结、分析,并用一个算例进行了说明。从中可看出,除了每一种方法本身多多少少存在的问题外,由4种方法计算所得的结果也相差很大。目前,水利行业采用规范^[7]进行设计,水电行业采用规范^[8]进行设计,从上可看出,按照这两本规范设计的结果相差很大,这将会造成设计人员的混乱和无所适从,因此迫切需要对水工液压启闭机的稳定性计算方法进行系统的研究,确定一种合适的计算方法,供设计人员使用。我们将从变截面压杆稳定性的微分方程入手,对水工液压启闭机的稳定性进行深入研究,并给出具体表达式。限于篇幅,将在另文中详细讨论。

参考文献:

- [1] 郭应龙. 液压缸的稳定性分析[J]. 武汉水利电力学院学报, 1988(2): 23-33.
- [2] 陶亦寿, 魏文炜. 大型卧式液压油缸挠度与稳定性计算[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(5): 23-26.
- [3] 赵荣俊, 金逸, 陶亦寿. 液压启闭油缸的稳定性设计方法研究[J]. 水利水电快报, 2007, 28(1): 21-23.
- [4] 严根华, 赵建平, 董家. 水工液压启闭机整体纵向受压稳定试验及三维有限元分析[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2011.
- [5] 水利水电工程启闭机设计规范: SL 41—93[S]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [6] 水电水利工程启闭机设计规范: DL/T 5167—2002[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [7] 水利水电工程启闭机设计规范: SL 41—2011[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [8] 水电水利工程液压启闭机设计规范: NB/T 35020—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [9] 水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988.
- [10] 胡孝良. 水工起重机械[M]. 北京: 水利水电出版社, 1989.
- [11] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
- [12] 村冈虎雄. 油缸[M]. 李宗国译. 北京: 机械工业出版社, 1974.
- [13] 钢结构设计规范(试行): TJ 17—74[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1974.
- [14] 马尔津逊. 水工建筑物的启闭机械[M]. 行少阜, 周新民译. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [15] 起重机设计规范: GB 3811—83[S]. 北京: 中国标准出版社, 1983.
- [16] 起重机设计规范: GB/T 3811—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] 钢结构设计规范: GBJ 17—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.