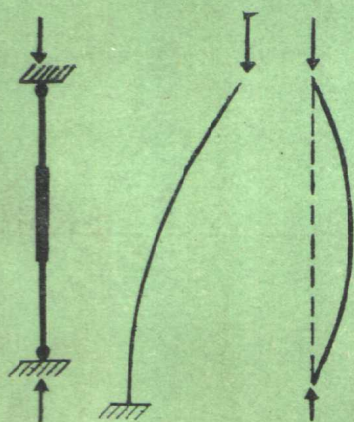


钢压杆的 承载力



人民铁道出版社

钢压杆的承载力

钱冬生

人 民 铁 道 出 版 社

1980年·北京

钢压杆的承载力

钱冬生

人民铁道出版社出版

责任编辑 王能远

封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 8.125 字数: 182 千

1980年1月第1版 1980年1月第1次印刷

印数: 0001—7,300 册

统一书号: 15043·6194 定价: 0.84 元

前 言

本书采用极限状态观点，分析了制订中心钢压杆容许应力的三个不同准则，介绍了影响钢压杆承载力的五种因素，系统地阐述了计算钢压杆的各种经验公式、历史上一些有名的钢压杆试验、钢压杆纤维屈服荷载的计算、压弯杆的强度验算、理想直杆压屈荷载的数学解和近似解（能量法、数值积分法、差分法）、有缺陷压杆的压溃荷载以及国外制订压杆容许应力的经验。对于我国铁路采用压溃理论制订钢压杆容许应力情况，介绍较为详细。对于一些陈旧的观点，进行了评论。对于一些新的见解，有选择地进行了介绍。对于从事钢桥和钢结构工作的工程人员、研究人员、教师和学生，以及希望对这一问题的实质、它的历史发展和当代水平有较为深入的了解者，具有参考价值。

本书承郭可谔工程师校核，谨表谢意。

钱冬生

1979年3月

目 录

一、引言	1
1. 制订容许应力所需使用的极限状态观点	1
2. 钢压杆的总体稳定问题	7
3. 进行本书各项计算所取的前提和所用的原理	16
二、钢压杆经验算式和钢压杆试验	19
1. 压杆经验算式	21
2. 对压杆理论的验证试验	26
3. 压杆的另一些试验资料	40
三、决定中心压杆容许应力的纤维屈服准则和压弯杆强度验算	49
1. 直杆偏心加载时的挠度和纤维应力的数学分析	49
2. 直杆偏心加载时挠度的逐步逼近分析	54
3. 有初弯曲的压杆的挠度和纤维应力的数学分析	58
4. 梁柱式杆的计算	64
四、用微屈时的平衡条件推算压屈荷载的数学解	78
1. 弹性压屈荷载	78
2. 弹性工作理想直杆在纵向力大于压屈荷载时的挠度	93
3. 双模量理论的弹塑性压屈荷载	99
4. 切线模量理论的弹塑性压屈荷载	105
5. 考虑残余应力时钢压杆的弹塑性压屈荷载	116

五、压屈荷载的近似解	125
1. 按随遇平衡时的功能守恒原理求压屈荷载	125
2. 按位能最小值原理求压屈荷载	144
3. 逐步逼近的数值积分法	155
4. 差分法	168
六、压溃荷载	177
1. 矩形截面小型压杆的压溃荷载	178
2. 焊接工形截面杆对弱轴的压溃荷载	193
3. 不考虑残余应力的压溃荷载近似计算	211
七、综合介绍国外对中心压杆容许应力的制订情况 和经验	220
1. 用经验公式制订中心压杆容许应力的情况	220
2. 用纤维屈服准则制订中心压杆容许应力的 情况	224
3. 用压屈准则制订中心压杆容许应力的情况	230
4. 用压溃准则制订中心压杆容许应力的情况	234
参考文献	246
本书所用人名、规范名、学会名的中外文对照	251

一、引言

1. 制订容许应力所需使用的

极限状态观点

(1) 关于极限状态观点的介绍

在荷载和其他因素（例如温度）的作用下，结构有可能出现两类极限状态。一是破坏性极限状态，它表示结构从根本上不再能够使用；一是不良性极限状态，它表示结构出现了某种缺点（例如，开裂或变形过大等），不适于正常使用。采取极限状态观点来处理结构问题，包括制订容许应力，就是指针对不同的极限状态，进行较为深入的研究，有针对性地采取措施来防止它们出现。这样，结构才能够既安全又适用地满足设计意图。所以，对处理结构问题和制订容许应力来讲，我们是不应该离开这一观点的。

极限状态数目较多，它们往往在本质上有很大区别。当研究工作还没有将某一极限状态的本质揭露出来时，为了适应结构设计的需要，人们往往沿袭某一个对于另一已知的极限状态行之有效的概念，来解决所遇的问题。就当时的生产实践讲，这是需要的。但它终究是权宜之计，是不可能把问题解决得经济、安全而又合理的。当研究工作已经进展到能够揭露所遇极限状态问题的本质，针对其发生破坏或不良的原因而提出合理解决办法时，如果还留恋于所习惯的权宜之计，那就会既不利于生产，也不利于科学技术的发展了。

历史上，极限状态的概念是从破坏状态的概念发展起来的。它认为：构件的安全度，应当用破坏荷载除以工作荷载

来表示，即：

$$\text{安全度} = \frac{\text{破坏荷载}}{\text{工作荷载}}; \quad 1.1$$

而不应当用下式所示的应力观点来表示：

$$\text{安全度} = \frac{\text{材料强度}}{\text{工作应力}} = \frac{\text{钢材屈服点}}{\text{工作应力}}。 \quad 1.2$$

关于钢材强度为什么用屈服点来充当，这将在本节之（2）再讲。对比式1.1和1.2，可知前者着眼于荷载，后者着眼于应力。按前者所制订的设计准则是：

$$\text{工作荷载} \leq \text{容许荷载} = \frac{\text{破坏荷载}}{\text{安全度}} \quad 1.1 a$$

按后者所制订的设计准则是：

$$\text{工作应力} \leq \text{容许应力} = \frac{\text{屈服点}}{\text{安全度}} \quad 1.2 a$$

设计单纯拉杆时，由于荷载应力匀布于杆件横截面，当匀布应力达屈服点时，杆件所承受的荷载也达到破坏荷载，因此，无论是用式1.1 a、还是用式1.2 a为设计准则，它们的结论是一致的。但在设计梁时，因为荷载应力在截面上分布不匀，一般要按弹性工作的假定，才好计算它的纤维最大应力。按照后一准则，那是以梁的纤维最大应力开始达屈服点时的状态为一“危险”状态；限制纤维工作应力不大于容许应力，就等于限制工作荷载不大于“危险”状态时的荷载除以安全度所得的商。而按照客观实际，梁在其纤维应力开始达屈服点时并不立即发生危险；只要梁内还有相当一部分材料还处于弹性工作状态，其挠度就不会突然增加，梁的使用性能并未被破坏；而对于结构钢来讲，它在屈服时并不开裂，也算不上什么不良状态（注：钢杆件在冷矫过程中总要经历屈服，但它们一般地并不开裂，也并不影响构件使用质量），所以，不能将纤维应力刚达屈服点算作是梁的极限状

态。对于这状态的梁，还可以再加荷载，直至梁的绝大部分进入塑性，挠度很大，堪与拉杆应力达屈服点时的变形相比，那才是梁的破坏状态，其时的荷载才叫破坏荷载。按照前一准则，工作荷载应当不大于这破坏荷载除以安全度所得的商。由于梁的破坏荷载总大于它的上述“危险”荷载，若采用同样大小的安全度，则按这两准则算得的结果，它们的差别就很明显（还和截面形状有关，即：工形梁的差别较小，圆截面梁的差别很大）。至于人们在认识到前一准则的正确性，但要在日常设计工作中还保留式 1.2α 的形式的情况下，参照前一准则的成果，将式 1.2α 中的安全度适当降低（使梁所用安全度比拉杆所用安全度为低），那还是采纳了极限状态的观点的。所以，同是采用容许应力的形式，其观点也可以有很大差别，这是我们所应该明辨的。

随着生产和科学技术的发展，我们可以看到：

1) 并不是所有的结构破坏都是决定于荷载的大小；例如，风的动力破坏并不是主要地决定于风压强度；腐蚀疲劳也并不是主要地决定于荷载大小；对于这些情况，安全度的概念就要重新定义；

2) 按弹性工作及理想的几何形状为不同构件所推算出来的“危险”荷载，在考虑了塑性、几何缺陷乃至其它因素之后，时常会发觉它们并不能代表这些构件的极限承载能力；有一些原来的推算值是偏大（例如，压杆），有一些则是偏小（例如，板梁的腹板）；

3) 要将不良性状态列入考虑之中，极限状态的观点方才能够比较地全面；

4) 要将材料强度、荷载、结构尺寸公差、工作条件等可能发生的变化计及，才能使结构的安全度具有一定保证率。

在所列举的四个方面中，第3)和4)业已受到较多的注意，开始有了系统的研究；而第1)和2)则只是在专题研究中涉及。但若从发展的观点看，将一些以往没有当作极限状态、但在客观现实中确实属于极限状态者提出来研究，并且在理论和实践两方面同时进行推陈出新，更应提倡。本书之所以从极限状态观点讲起，就是由于这一原因。

(2) 关于钢结构基本杆件的极限状态

极限状态观点，从原理上讲，可以通用于各种结构、它们的各种构件和连接。但就本书所涉及的内容讲，只需联系到钢结构的三类基本杆件，即：拉杆、压杆和梁，也就够了。

受拉为主的杆件，其极限状态是：屈服、脆断、疲劳和振动过大。取屈服作极限状态，这是和结构钢有明显屈服点，其屈服台阶（指应力保持于屈服点左近时的应变持续增长量）往往达1~3%相联系的。当一榀桁架的一根主要拉杆的毛截面应力因达到屈服点而发生1~3%的应变时，我们若用结构力学方法推算由此所引起的桁架挠度（例如，用式5.5），就可发觉这样大的挠度（或称之为总变形量）足使桁架不再能够使用，所以有理由叫它为破坏性极限状态。就这一方面讲，限制拉杆的毛截面应力，要比限制净截面应力为合理。但考虑到历史习惯，还考虑到各种构件（例如，铆接杆）在其净截面和毛截面之间往往有一大致的比率，限制前者也就相当于限制后者，所以，对于拉杆设计，现在还是按净截面计算其工作应力 σ ，并按式1.2a去验算。这时的容许应力叫作基本容许应力，用 $[\sigma]$ 表示；而屈服点用 σ_s 表示、安全度用 n 表示时，式1.2a又可写作：

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} \quad 1.2b$$

如上所述，这是和式1.1相一致的。

脆断是决定于材性、构件缺口尖锐程度、使用温度等因素的。按经验，钢拉杆发生脆断时的截面平均应力往往只是700~800公斤/平方厘米。若靠降低 $[\sigma]$ 的法子来防止脆断，显然是行不通的。注意到结构钢的韧性随温度而降低方面有一显著的转折温度，因此，根据钢结构使用温度及工作条件而对其所用钢材的韧性转折温度给一限制，这就成为目前防止脆断的一种暂行措施。不少钢结构规范现在就是这样办理的。

疲劳开裂决定于加载次数、每次加载所到达的最大和最小名义应力、缺口尖锐程度、材性、环境等因素。苏联桥涵设计规范是将疲劳归入破坏性极限状态一类的〔62—1〕*。但只要从材料的选用方面保证疲劳开裂不致转变为脆断，则在结构的疲劳开裂发展到某一尺寸时（这尺寸由所用探伤设备的灵敏度决定），它就会被发现，而在得到及时处理之后，破坏性事故就可避免。所以，将疲劳开裂列入不良性极限状态，似乎是更恰当的。在某些情况，也可以不靠加大构件截面，而是从改善缺口情况以防止疲劳开裂，这也是它的特点。

振动过大，这在杆件长细比太大时就会产生。这是一种不良性极限状态。但就数量方面讲，在什么条件下发生多大的振动才叫作不良，还没有定论。所以，目前只是参照钢结构使用经验，对拉杆长细比给一个最大限，借以达到防止它出现的目的。此外，按照钢桥使用经验，长细比大的工形截面挂杆，两端用长列的铆钉作连接时，在其进入连接的第一排铆钉孔处，杆件净截面时常出现裂纹。这是激振引起的疲

* 本书用列在方括号内的数字表示参考文献的编号；参考文献目录列在正文之后。以下注明参考文献的方法，与此相同。

劳开裂，而激振的频率和振幅既和长细比有关，也和截面其他性能（例如，抗扭性能）有关。这还是需要通过今后的研究才能逐步明确的一个问题。

受压为主的杆件，如果有时还受拉，上面所讲的各极限状态就都应该考虑。如果并不受拉，其主要极限状态就是压溃，这将在本章之2再讲。此外，需要对受压屈服是否应该验算在这里讲一讲。有些教科书说：压杆也应照拉杆一样，按净截面计算的匀布压应力不应超过基本容许应力，并称之为强度验算。事实上，压杆不论长短，其破坏特征都是压溃（弯曲和受压同时发生）。长压杆因压溃强度远低于屈服点，用净截面进行这一强度验算并无实用意义。短压杆若要添列这一验算，对截面设计当会发生影响。可是，从实用杆的试验成果和理论阐述〔见二、3（2）〕可知：当压溃时，短压杆的毛截面应力会达到或超过屈服点。凭短压杆的实际破坏状态（即压溃）来制订其毛截面容许应力，这乃是实事求是的做法。为什么要按照拉杆验算的模式去验算净截面应力呢？而且，短压杆在破坏时的纵向压缩量（包括因屈曲而生的两端之间距离的缩短）并不大，不会像拉杆屈服那样引起较大的结构变形，这又是在制订短压杆毛截面容许应力时所注意到了的。所以，我国《铁路工程技术规范》在第二篇《桥涵》中业已规定钢压杆只需使用它的毛截面积来进行稳定验算。这就将那一个并不需要的“强度验算”废除了。

受弯为主的梁，主要极限状态是屈服、受拉翼缘的脆断、总体失稳和局部失稳，以及挠度或振动过大。屈服，这应该是指截面绝大部分的应力都已达屈服点，梁发生塑性变形，挠度因而很大的情况，这在（1）内已经讲了。焊接板梁桥因受拉翼缘脆断而发生的重大事故，在加拿大和澳大利亚都曾经有过。根据调查分析，除材性以外，焊接缺陷也会

是重要原因（例如，对澳大利亚墨尔本1962年焊接桥脆断事故的调查表明：脆断是开始于板梁外层盖板终止处的某些焊接缺陷）。总体失稳是指在梁的受压部分有较长一段没有侧向支承时所发生的全梁翘曲失稳，这同工形截面梁的抗扭能力较差有关，局部失稳是指梁的板件在其宽厚比大时所发生的板件翘曲，当受压翼缘因翘曲而退出工作时，梁的抗弯能力即急剧下降，重大事故也会立刻发生。挠度或振动过大属于不良性极限状态，现今处理方法还是凭经验对梁的挠度给一个限值。

综上所述，极限状态确实是多种多样，各有特点。用极限状态观点处理结构问题的所以正确，就在于承认了极限状态的这种千差万别，摆脱了旧概念旧理论的束缚，实事求是地向着我们知之不多的领域去进军。它符合于辩证唯物主义。所以，它能够生气勃勃，所向披靡。

2. 钢压杆的总体稳定问题

（1）制订中心压杆容许应力的三个不同准则

顺着杆件的纵向（即长度方向），在其两个端横截面中心（即指形心），作用着一对互相平衡的压力，这样的杆就是日常所讲的中心压杆，简称压杆。作用于其两端横截面的一对压力，在讲压杆时，往往习惯地叫作荷载。由于实用杆不会是理想的直，而作用荷载也很难准确地对准横截面中心，这就使中心压杆实际是处在压弯状态。随着荷载的增长，杆的弯曲变形增大，弯矩的增长也就比荷载的增长来得更快。压杆的破坏，在实质上是一个压弯共同作用的问题。这就是这一破坏现象的实质*。今将这一现象叫作压溃。

* 有时也会发生扭转，本书作者将另编《开口薄壁钢杆件》一书去阐明。本书则以讲述压弯型式的压杆破坏为限。

现在将拉杆和压杆作一对比。拉杆也会由于杆件不直或荷载偏心而产生弯矩，但在荷载（即拉力）增大时，弯曲变形越来越小。当杆因荷载很大而全截面屈服时，其截面任一点的应力实际上都达到屈服点，也就是整个截面达到应力匀布状态。因此，按式1.2b制订拉杆的 $[\sigma]$ ，只考虑材性，不考虑几何缺陷（指杆件不直和荷载偏心），仍然是正确的。

可是，这样地对待压杆就不成了。如上面所指出的，压杆破坏是由于压和弯的共同作用，可是，弯矩数值多大，截面应力如何分布，却是不易回答的问题。

从极限状态观点讲，压杆承载力应当是指实用杆在破坏前承受最大（或叫极限的）荷载的能力。当这一承载力用其最大荷载（或叫极限荷载）来表示时，这最大荷载就叫压溃荷载。

由于压溃荷载的推算较繁复，力学工作者往往是取中心受压的理想直杆为计算对象，并以直杆刚刚不能稳定地保持顺直时的承载力为准。当这一承载力用其荷载表示时，这荷载就叫压屈荷载。

此外，还有一个以纤维应力刚达屈服点为准则的压杆荷载推算法。它是从受弯为主的杆的强度验算原理推论出来的。在其推算中，要先给压杆以一定的初弯曲或初偏心，再按弹性工作推算杆件在纵向压力下的挠曲，借以计算杆件在纵向压力下所受的最大弯矩，从而计算其最大纤维应力，并将这最大应力刚达屈服点时的压杆荷载当作压杆所能承受的荷载来看待。由此可见，就当前的实践讲，可以有三个不同的准则来衡量中心压杆承载力*。它们是：

* 在实践中，中心压杆是指在设计之中按中心受压来计算的直杆。但在设计计算中所不考虑的引起弯矩的各因素，则是我们在推算其承载力并制订容许应力时所必需研究的。

1) 压溃荷载——所反映的是实用杆（主要特点是有几何缺陷）的承载力；

2) 压屈荷载——所反映的是理想直杆在中心加载情况下刚刚不能稳定保持顺直时的承载力；

3) 纤维屈服压杆荷载——所反映的是一根有初弯曲或初偏心的杆在纤维应力刚达屈服点时所承受的荷载。

中心压杆的验算，现在还是采用容许应力的形式。工作应力是按工作荷载（中心压力）匀布于杆件横截面积计算。压杆容许应力也就是用上述三种荷载除以横截面积，再除以安全度所得的商。当采用压溃荷载时，安全度一般是照式1.2b'内的基本安全度（常数）取用。当采用压屈荷载时，由于它没有考虑压杆实际存在的几何缺陷，安全度就需加大，而且，一般是取变数。当采用纤维屈服压杆荷载时，安全度往往也是取常数。

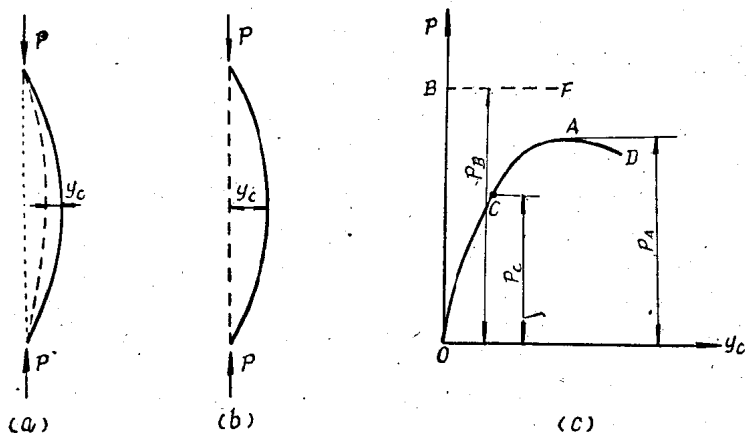


图 1—1 压杆承载力三个不同指标示意

现在，要用图 1—1c 所表示的有代表性的压杆荷载 P 和

相应的杆中挠度 y_c 的关系来说明这三种指标的区别。图 1—1c 中的 $OCAD$ 线表示图 1—1a 那根有初弯曲的实用杆的 $P-y_c$ 关系。随着 P 的由零上升, y_c 的增长率越来越大。当压杆纤维应力刚达 σ_s 时, 荷载 P 是 P_s , 现在图中用点 C 标出。由图可见: 点 C 在 $OCAD$ 这一条 $P-y_c$ 关系线上并无特色, 它并不能通过实测的 $P-y_c$ 关系来决定。要想将它在图上的位置定出, 只好根据计算。所以, 从极限状态观点看来, P_s 大致是和梁在纤维应力刚达屈服点时的“危险”荷载一样, 不能算是极限状态时的荷载。在那之后, 荷载仍可增加, 但在杆件截面的塑性区 (应力达屈服点的区域) 不断扩大的情况下, y_c 增加得更快, 荷载 P 不久就达到其最大值, 如图中的 P_A , 在曲线上现用点 A 标出。在那之后, 由于塑性区的继续扩大, y_c 还可增加, 但截面应力的总和 (按平衡条件是和荷载 P 相等者) 却要较 P_A 为小, 使其时的 $P-y_c$ 关系如 AD 段所示。由此可见, P_A 是这杆所能承受的最大 (即极限) 荷载, 它的值就是压溃荷载, 而用它来作承载力指标, 自然是符合极限状态观点的。再从稳定性方面讲, 在 OCA 段, 曲线上升, 要保持较大的 y_c , 就要增加 P ; 如果杆因干扰而使 y_c 暂时增大, 但 P 未增加, 则在干扰撤去后, 由于 P 保持不住增大了的 y_c , 杆就会恢复原状, 因而是稳定的。在 AD 段, 曲线下降, 若杆因干扰而使 y_c 暂时增大, 则在 P 没有及时降低的情况下, 由于它超过了和增大的 y_c 相平衡的 P , 那它立刻就把压杆压垮了。因此, 这是不稳定的。由此可见, 点 A 是处在稳定的 OCA 段和不稳定的 AD 段之间的转折点。将发生质变的这一转折点取作极限状态, 这也是符合客观实际的。

图 1—1b 表示一理想直杆。图 1—1c 中的 OB 线是其 $P-y_c$ 关系示意。 P_B 表示压屈荷载, 点 B 标出其 P_B 和 y_c 关

系。当 $P < P_B$ 时，杆件稳定地保持顺直， $y_c = 0$ ，其 $P-y_c$ 关系如 OB 线所示。当 $P = P_B$ 时，杆件既可顺直，而在受干扰后也可以平衡地逗留在屈曲状态，这样， y_c 就可以不是零。而杆的顺直状态就不再是稳定的。由于在这一理论中不包括 y_c 的计算，在图中就用虚线 BF 表示其关系。又因在 $P = P_B$ 时， y_c 既可是正（如图中的 BF 线所示），也可是负（指挠度 y_c 发生在负值方向，但在这图未绘），这使曲线在点 B 分成两叉，各代表一能够发生的平衡的状态。这现象就被叫做“分枝”。那也是压屈的一个特征。

再将曲线 $OCAD$ 和 $OBFB$ 对比一下，还可体会到：压溃理论是在对压杆破坏全过程进行考察之后，将 P_c 挑出来的；而压屈理论是只抓住压杆在特定条件下（即：理想直杆中心受压）的一时表现。从解决问题的需要讲，真正有用的还应是事物在全过程中的表现；而一时表现，只是当它能从数量上反映全过程表现中的决定性指标时，那才会具有价值。本书之所以将压溃理论放在重要位置，即基于此一理由。

（2）对压杆承载力起决定作用的五个因素

这五个因素对压杆承载力的影响是交错在一起的，分开来叙述有一定困难。在本书第一章将它们总起来讲一下，这是必要的，但也不能讲得太细，因为那将涉及后面几章的内容。现将这五个因素分析如下。

1) 材性 因为压杆破坏是由于压弯，而杆各截面所受的弯矩是等于纵向力（荷载 P ）乘以总挠度所得的积（有些规范和教科书将压杆问题叫作纵向挠曲问题，就是由于这个原因），挠度的大小则是和材料的模量（即应力增量对应变增量的比值）值有关，所以材性之中和模量有关的量都对压杆承载力有很大影响。例如，弹性模量 E ，它对杆的弹性