

锚索测力计安装技术及测量误差的预防

基康仪器（北京）有限公司 技术部

（北京海淀区彩和坊路8号天创科技大厦1111室 邮编10080）

关键词：锚索 测力计 负载传感器 安装 测量误差 失配 预防措施

1. 概述

作为一项应用成熟的技术，基康振弦式锚索测力计（也称负载传感器、荷载盒，简称锚索计，下同）在国内外数千个工程的岩土锚固方面已得到广泛应用。但由于振弦式锚索测力计工作特性，部分用户在安装使用过程中时常因应用存在欠缺或不当使用，出现锚索测力计安装中或安装后的测值与实际荷载存在偏差，导致测量精度降低甚至产生极大偏差。

本文结合实际应用中经常遇到的问题，从锚索计的结构、现场率定、安装及数据计算处理来分析说明，并介绍一些锚索计安装及应用上的技巧，以最大限度消除因安装不当产生的测量误差。

2. 振弦式锚索计主要类型及其工作原理

按照外形结构（或锚具类型），基康锚索计分为圆筒形锚与异形锚，如下图1-1、1-2所示。



图 1-1 基康圆柱形锚索测力计

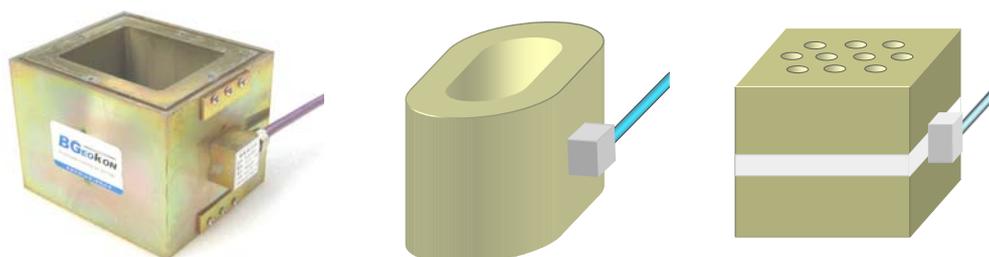


图 1-2 基康异形锚索测力计

其中圆柱形锚索计应用最为广泛，且使用效果最佳。异形锚索计具有正方形、长方型、椭圆及多孔型，这些锚索测力计在安装时对承载基面及张拉方式要求较为严格，并且只有在受力非常均匀的环条件下才能取得较好的测量效果，否则将会导致较大的测量误差。

根据量程的不同，基康锚索计是在一个均匀的弹性合金筒体（承载体）上沿圆周内置 3~6 个高精度的振弦式传感器（微型应变计），如图 2 所示，其工作原理为：当锚索计安装后，荷载均匀地施加到锚索计的承载面上，使承载体压缩变形，其变形量通过振弦式应变计感应并测量，通过测量这些传感器平均值的变化量，即可计算获得锚索的荷载变化。

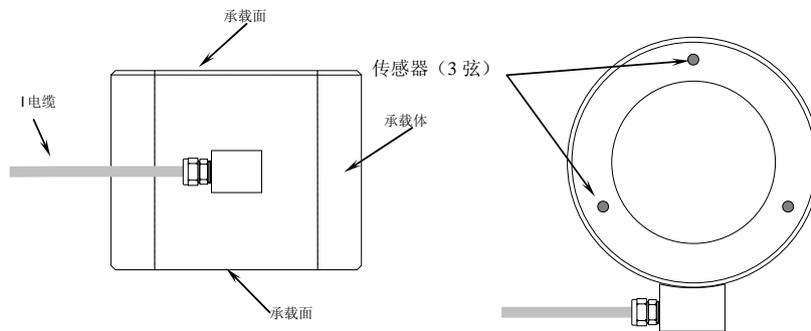


图 2 锚索计结构示意图

锚索计的上下两个承载面设计为相互平行且精度较高的平面，理论上与荷载方向垂直，理想工作状态下，荷载均匀分布在承载面上，这将使得每支振弦式传感器所感应的变形是相同的。但实际应用中锚索计承载面上施加的荷载不一定是完全均匀的，各传感器所感应的变形也有大有小，在荷载偏心不大的条件下，通过计算传感器的平均值，即可消除因荷载的局部偏心导致的测量误差。

3. 锚索测力计安装使用过程中常见问题及误差原因分析

3.1 锚索计的安装

严格地讲，锚索计应工作在理想或接近理想的条件下，即保证锚索计安装在受力均匀的环境中，才可获得良好的测量效果。但由于现场条件的限制，锚索计通常安装在承载基面较为粗糙的工作垫板与工作锚之间，通常按图 3 所示的方式进行安装。

要获得最佳的测量精度，锚索计安装良好是必要的前提条件，一般体现在以下几方面：

- 1) 锚具的尺寸必须与锚索计尺寸相匹配，即锚索计承载面必须与锚具或工作垫板全接触。
- 2) 承载基面必须平整，或增加锚垫板进行适配过渡；
- 3) 承载面必须与锚索的受力方向尽可能保持垂直，即承载面与锚索孔出口段（喇叭口）轴线的夹角应控制在 $\pm 1^\circ$ 以内，以减小偏心荷载。
- 4) 推荐使用整体逐级张拉方式，不宜使用单根张拉。

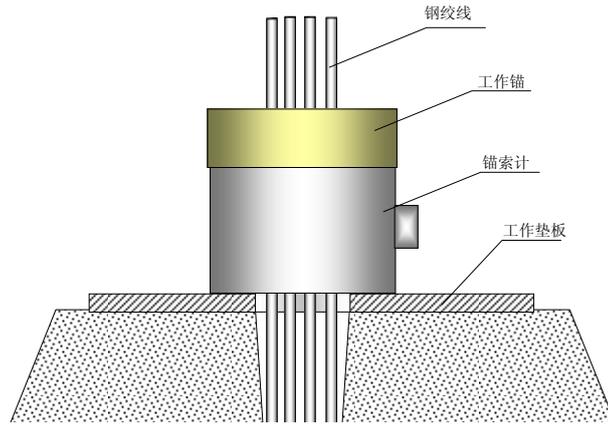


图 3 锚索计常见安装示意图

3.2 锚索计安装过程中常见问题及测力误差分析与处理预防方法

(1) 安装方式不当带来测量误差

锚索计的测量性能不仅仅取决于锚索计本身，还取决于锚索计的安装质量，通常有以下几种原因会导致测量精度下降。

1) 直接安装在粗糙的承载面而产生测值误差

由于锚索计设计工作在近于理想的环境条件下，但现场的工况往往与预期的不一致，如工作垫板承载基面不平整，或因工作锚与锚索计相接触的一面凹凸不平，施加在锚索计承载面上的荷载为点荷载或形成边缘效应，使得锚索计承载体受力不均匀，导致某一个或多个传感器受力状态小于（当远离点荷载区域）或高于（当靠近点荷载）真实荷载，从而导致测量误差，如图 4 所示。

根据基康振弦式锚索计使用经验分析，该误差大多在 -5% 左右，有的甚至可能达到 -15% 。严重者将导致锚索计承载体局部过载变形造成锚索计失灵或永久损坏。出现的误差大多以负误差体现，而出现正误差的现象却少见。

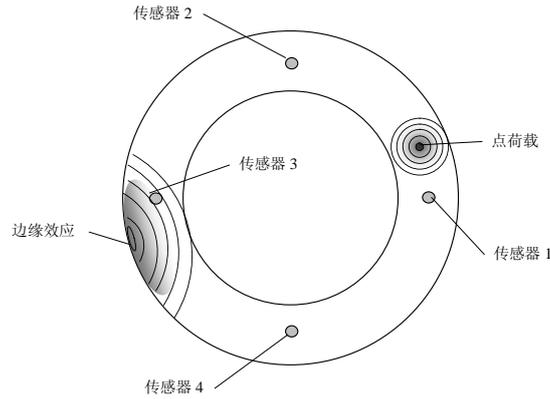


图 4 点荷载及边缘效应导致锚索计荷载分布不均匀

主要原因分析：由于工作垫板或工作锚通常为锚具生产厂家配套且多为铸铁加工，（限位槽）承载面凹凸不平或铸造过程中变形严重，用户无法在现场进行平整处理或再加工。这种承载面因本身不平整而形成了点荷载。

常用解决方法：增加厚度适宜的锚垫板作为过渡垫板，将因原承载面本身不平整导致的集中应力被过渡垫板重新分布，使得传递到锚索计受到的应力为均布荷载，从而提高了锚索计的测量精度。

采用这种处理方法，在增加锚垫板并不存在偏心荷载的前提下，锚索计的实测值在锁定后实测误差可轻易控制在 2% 以内。以云南某水电工程使用两台基康 4900—200T 锚索计为例（如图 5），用户前后反映这两台仪器安装后实测误差非常大，怀疑是锚索计本身性能问题，后送回基康公司检查并重新率定，未发现锚索计有质量问题，在直接将这两台传感器返回给用户后，基康公司派员前往现场查看，发现安装这两台锚索计的工作垫板上的限位槽非常粗糙，虽经用户使用磨光机打磨但表面凹凸不平无法满足安装要求，后经增加锚垫板后，并将这两台锚索计新安装，经测值对比，效果良好。



08-7844 安装（预紧）照片



08-7908 安装（张拉）照片

图 5 锚索计安装图片

其中编号 08-7844 的锚索计初次安装后当时记录的测量数据如表 1。

表 1 编号 08-7844 的锚索测力计安装记录表

厂家编号: 08-7844		系数K=1.303		设计编号:		时间: 2008年10月15日	
分级张拉 (Kn)	1号线性读数	2号线性读数	3号线性读数	总平均	温度(°C)	实测荷载(Kn)	备注
	7585.3	7640.8	7561.8	7596.0	27.5	0.0	
300	7424.9	7342.5	7408.7	7392.0	27.6	265.7	
750	7209.1	7001.7	7122.6	7111.1	27.7	631.7	
1125	6983.1	6728.9	6852.8	6854.9	27.6	965.6	
1500	6737.3	6493.1	6585	6605.1	27.8	1291.1	
1725	6537.2	6304.8	6406.3	6416.1	27.8	1537.4	张拉结束
	6645.3	6510.5	6521	6558.9	27.8	1351.3	卸顶后差149

技术员:

由上表可见，编号 08-7844 锚索计在首次安装时，在张拉过程中与千斤顶的读数误差最大可达-9.4%。后经增加锚垫板处理，该锚索计二次安装时读数对比见表 2，在张拉过程中，其读数误差也非常小，其误差产生的主要原因是张拉过程中千斤顶压力不能稳住，读数不能与压力表同步进行，略有滞后现象。通过数据可见，在拉至最大荷载 2012KN 时，计算荷载与千斤顶对比仅为 0.6%。并且在锁定后，出现了 11.2% 的锁定损失。

表 2 锚索计 08-7844 二次安装过程中数据记录表

仪器编号	08-7844	仪器系数 G	1.303kN/digit	计算零读数	7607.7
	千斤顶表压 换算压力 kN	温度	锚索计读数 平均值	计算荷载 (kN)	备注
现场零读数		27.3	7619.1		
预紧后读数		27.1	7474.1	174.1	
1 级张拉	350	27.1	7286.4	418.6	
2 级张拉	875	17.1	6947.0	860.8	
3 级张拉	1312	27.0	6640.9	1259.8	
4 级张拉	1750	27.9	6328.3	1667.1	
5 级张拉	2012	27.9	6072.8	2000.0	锁定
千斤顶卸载后		26.8	6245.7	1774.7	产生锁定 损失

表 3 为编号为 08-7908 的锚索计在首次安装时的读数记录，因张拉过程中误差太大未完成张拉。

表 3 编号 08-7908 的锚索测力计安装记录表

锚索测力计安装记录表

厂家编号: 08-7908 系数K=1.313 设计编号: 时间: 2009年6月12日 8:00

分级张拉 (Kn)	1号线性读数	2号线性读数	3号线性读数	总平均	温度(°C)	实测荷载 (Kn)	备注
	7362.7	7170.9	7293.2	7275.6	27.5	0.0	
200	7303	7122.5	7087.6	7171.0	27.6	137.3	相差62.7Kn
500	7110.7	6974	6818.8	6967.8	27.7	404.1	相差95.9Kn
750	7003.8	6856.3	6621.8	6827.3	27.6	588.6	相差161.4Kn
1000							
1150							

技术员: _____

锚索计拆卸并增加锚垫板重新安装后，锚索计二次安装张拉时过程数据对比如下表 4 所示。由表中数据可见，除张拉过程中读数滞后产生的误差外，在张拉到最大荷载后，锚索计与千斤顶之间的的荷载误差仅为-0.8%。

表 4 锚索计 08-7908 安装过程数据记录表

仪器编号:	08-7908	仪器系数 G	1.313kN/digit	计算零读数	7312.0
	千斤顶表压 换算压力 kN	温度	锚索计读数 平均值	计算荷载 (kN)	备注
现场零读数		26.8	7321.7		
预紧后读数		27.2	7236.6	99.0	
1 级张拉	350		7049.4	344.8	
2 级张拉	875		6706.1	795.6	
3 级张拉	1312		6373.0	1232.9	
4 级张拉	1750		6036.7	1674.5	
5 级张拉	2012	28.9	5792.5	1995.1	

可见，直接安装在粗糙的承载面上的锚索计，增加锚垫板的处理措施，对避免产生测值误差具有良好的预防作用，达到事半功倍的效果。

对增加的锚垫板，其尺寸推荐为：垫板外径大于锚索计外径 5mm，内径小于锚索计内径 5mm，承载面（接触面）的平整度应在±0.1 内。相关垫板的厚度在后续章节中予以说明。需要注意的是，不可使用多块厚度较薄的钢板叠加后替代较厚的垫板，因为这样不会对测量结果有任何改观。

2) 工作锚与锚索计不同轴产生的测值误差

在安装过程中，由于操作控制不当，工作锚产生偏心滑移错位（如图 6 所示），使得锚索计与工作锚之间的接触面积减少，荷载不能均匀有效地加载到锚索计上，导致应力集中在锚索计某些区域上，这种误差随偏心的程度其大小不一致。

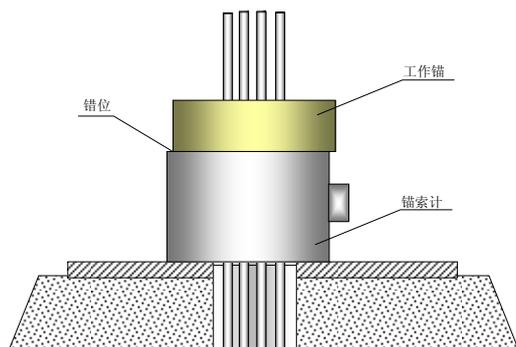


图 6 工作锚移位影响

此外，因为锚索孔与垫板的承载面不垂直，即有一定倾角所产生的偏心荷载，导致张拉过程中锚索计或工作锚产生滑移。这种影响量随倾角的不同误差大小也各有所异，严重的将会导致锚具失稳，并可能将钢绞线剪断。

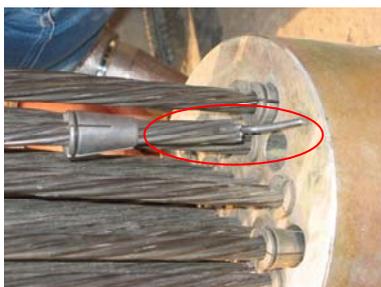
以下照片为某水电站闸墩由于不规范的锚索施工，使得锚索孔与垫板严重斜交导致锚索计失稳造成安装失败，如图 7。最终虽通过采取防滑措施后，其测值误差仍达-17%。



(a) 锚索计底部失稳



(b) 底部固定后工作锚失稳



(c) 失稳后被剪断的钢绞线

图 7 工作锚偏移问题

对工作锚偏移错位造成的偏心问题，其问题分析与预防处理办法见本章“偏心荷载”一节。

3) 工作垫板强度不足产生凹陷变形或锚固墩强度不足造成的测量误差

由于锚具生产厂家配套工作锚板较薄在受力后产生凹陷，导致锚索计承载面形成点荷载或线荷载；或在锚固墩浇筑质量不佳在张拉过程中产生破裂而产生应力损失或锚固失效，如图 8 所示。

基康公司的试验表明，因垫板过薄使得锚索计外边沿形成的线荷载将会导致锚索计产生“撮口”效应，“撮口”效应可使得锚索计测值将小于真实荷载，误差最大显示仅为真实荷载的 96%。



工作垫板凹陷变形



工作垫板凹陷变形及锚固墩产生裂缝

图 8 垫板强度不足或锚固墩缺陷问题

预防措施：严格按照规范工艺对锚固墩进行施工，确保浇筑质量。若仅为工作垫板厚度不足，可增加厚度适宜的垫板来提高安装质量。

4) 偏心荷载

偏心荷载造成的测量误差是锚索计安装中最常遇到的问题，其引起的因素是多方面的，如前文提到的工作锚错位或滑移引起的偏心，或后面谈及的张拉方式引起的偏心等。

①非正交偏心。由于在浇筑锚固墩时未将工作垫板所在平面与孔口段轴线保持正交，导致安装时锚索计与锚固墩均与受力方向产生偏斜角（一般指超过 $\pm 2^\circ$ 时），加载到锚索计上的荷载本分解为轴向与切向两个分量，而锚索计测到的荷载仅为轴向荷载，其测值将小于锚索实际荷载。这种安装是一种比较危险的安装，存在失稳的隐患。如图 9 所示。

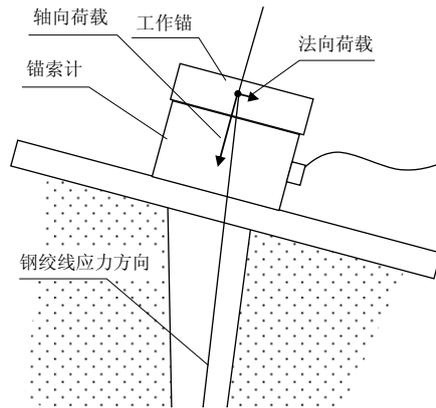


图 9 非正交偏心荷载

该情况下锚索计已工作在非正常状态，只能预防但无法纠正。预防方法为：在浇筑锚固墩时严格控制安装质量。

②正交偏心。安装时尽管钢绞线与锚索孔口段轴线平行，但有的锚索在注浆后使得孔口处的锚索包络圆轴线偏离了锚索孔中心轴而产生偏心（这种偏心荷载后产生后的实质又类似于非正交偏心），在排除其它缺陷的前提下，其正交偏心带来的误差可达到 10%左右。如图 10 所示。

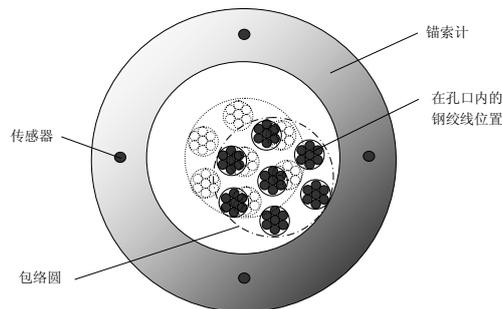


图 10 正交偏心导致锚索计荷载分布示意图

该现象可预防也可在安装时进行纠偏处理，方法为：在锚索计与工作垫板之间增加一块厚度足够的垫板进行过渡，使得锚索计的轴线与钢绞线束的中轴线保持一致，即通过垫板过渡，将钢绞线的应力重新均布在锚索计上。如图 11 所示。

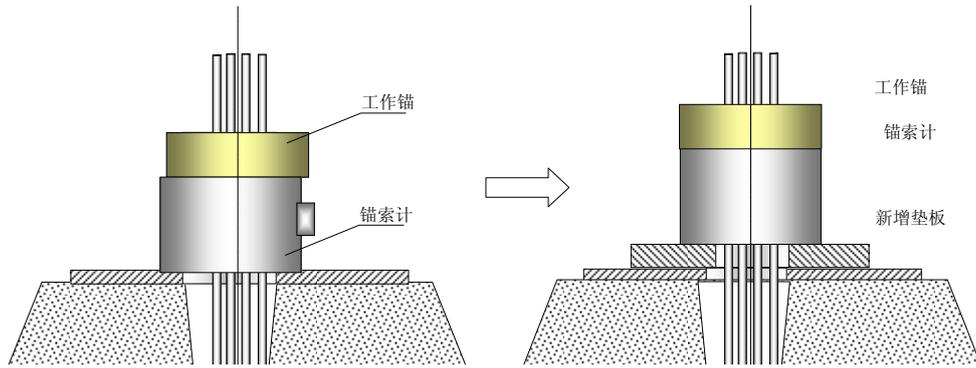


图 11 正交偏心的纠偏处理示意图

5) 过载张拉导致钢绞线断裂产生的影响

以某水电站用户使用的基康公司 200 吨锚索计安装为例，用户对锚索计进行了现场率定检验，并在安装时增加了合格的锚垫板，在锁定时为减小锁定应力损失对锚索超张拉了 15%（即张拉到标称荷载的 115%），锁定后锚索计读数为 160 多吨，与预计值 200 吨相差约-17%。随后到现场检查锚索计上各传感器在张拉过程中读数的变化量，发现有一根钢弦读数偏大即钢弦有张紧现象（表明荷载释放），经外观检查有 2 根钢绞线夹片松弛回弹，进一步检查发现这两根钢绞线已经断裂，而这两根钢绞线承受的荷载理论上应为 30 吨。考虑到锁定应力损失影响，检查结果表面锚索计也反映了当前该锚索的真实载荷状态。

6) 钢绞线张拉方式的影响

多数采用单根逐级张拉方式安装的锚索计，其测值会低于真实值 5%~15% 或更多，由于单根张拉的方法并不科学，钢绞线受力不均，无论操作多么精细，其本身应力永远小于预期荷载。由于单根张拉的误差比较大，在张拉过程中推荐使用整体张拉工艺，以减小这种人为影响。

7) 读数不同步的影响

锚索计在安装过程中需要将锚索计上的多个传感器逐个进行读数。在张拉过程中千斤顶若不能准确稳压，锚索计承载体或产生回弹，若读数滞后将导致计算荷载与实际荷载的不同步，多数情况下测值将偏小。因此应掌握读数的技巧提高读数速度，推荐使用锚索计专用读数仪或数据记录仪以提高读数的工效。

8) 锁定时或锁定后的应力损失带来的误差

锁定损失时应在最大预定荷载稳压数分钟后再进行锁定，以减小锁定损失。为消除或降低锚索的锁定应力损失，施工中通常需要进行超张拉。在安装环境满足技术要求的前提下，基康锚索计设计超张拉量应控制在标称荷载的 105%~108%，超张拉超过限值将会导致锚索计承载弹性性能下降甚至永久损坏。此外，在对钢绞线进行预紧时应保持钢绞线均匀受力，否则将会导致部分钢绞线超在超张拉后因过载而断裂。

9) 使用基康原装进口锚索计采用的计算方法不当。

用户在计算方法一直存在误区。通常认为，锚索计在计算时应在现场安装时无荷载的初始读数就是计算时的零读数，但零读数为理想直线下的零读数，该读数不同于锚索计无荷载下的零读数。也就是，锚索计的零读数应取率定表上给定的值而不是在现场无荷载下的零读数。应用中发现使用无荷载下的零读数计算误差有时很大，小荷载状态下与实际荷载竟然差 12% 以上。而使用率定表上给定的零读数计算，发现这样的误差完全可以减小到用户容忍的程度甚至非常满意的结果。

此外，锚索计（包括钢筋计）本身由于材料的关系，当受力在其额定荷载 15% 及以下时，刚体材料的均匀性不良且尚有残余应力，其内部在小负载范围内的残余应力会抵消部分荷载，可能在该范围内线性表现不佳，但不影响其整体测量性能。

3.3 锚具与锚索计尺寸失配后的解决方法

由于设计的变更或客户订货时尺寸提供错误，锚索计尺寸可能会出现与现场的锚具失配现象。由于锚索计是订制的，往往无法改动或更换，这将给用户造成一定的损失或浪费，但只要在标称荷载满足现场工况的前提下，通过如下方法仍可将部分失配的锚索计运用到工程中。

(1) 锚索计直径大于现场工作锚直径时的解决方法

通过增加较厚的锚垫板进行过渡适配，达到适用有效的目的。如图 12 所示，注意图中靠近工作锚的垫板应具有足够的厚度，太薄的锚垫板将在适用中产生凹陷变形并对锚索计产生扩张效应，导致锚索计的测值将高于实际荷载。

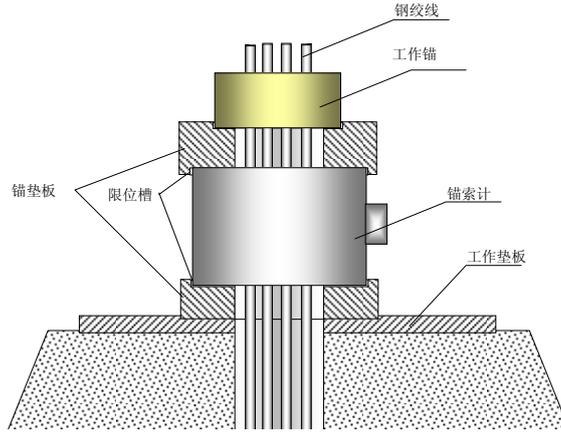


图 12 锚索计直径大于工组锚直径的适配安装方法示意图

(2) 锚索计直径小于现场工作锚直径的解决方法

这种现象比较少见，常用于应急。但必须保证锚索包络圆直径小于锚索计的内径才能实施，否则该方法不适用。还需要说明的是仍要保证锚索计上部的锚垫板具有足够的厚度，以避免“撮口”现象的产生。如图 13 所示。

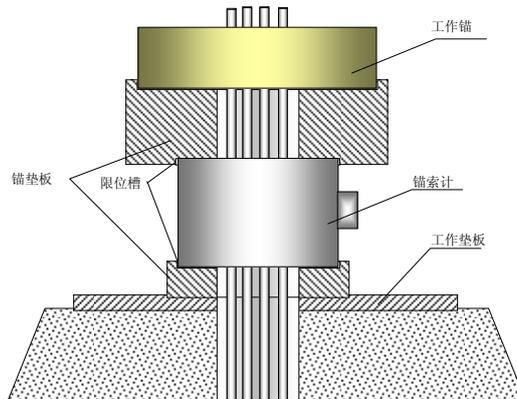


图 13 锚索计直径小于工作锚直径的解决方法

4. 锚索计的现场率定

通常的率定是采用压力试验机对锚索测力计进行加载。测量锚索测力计的输出与试验机所加载的荷载有关，通常试验机将压力加载到已知截面的活塞上。只要压力机本身周期性的进行检验校准，一般来说对于试验机的精度是无可质疑的。基康公司使用的压力机精度为 0.3%F.S，现场率定时推荐使用 0.5%F.S、或 1%F.S 精度等级的压力机进行率定。

通常在测试机上的测量试验是在宽大而厚实的平面平行台板间进行，这样就

避免了台板的弯曲，仅有弹性压力直接作用在锚索测力计上。

现场率定时，应注意每次加载到预订荷载时保持压力机的稳压时间，以留有足够的时间来对锚索计进行读数。

5、结语

实践证明，几乎所有的锚索计测值误差都与锚索计的安装不规范或操作方法不当有关。除推荐用户采取上述各预防处理措施外，对锚索计的安装推荐如图 14 所示方式，即根据锚具即锚索计的尺寸在锚索计的上下两个承载面均增加具有限位槽的锚垫板，其好处是：1) 能有效消除点荷载；2) 保持安装的同轴度；3) 降低或消除锚索在张拉过程的失稳可能。

需要说明的是，这种安装方法当不存在或略有偏心荷载的情况下测量精度才会有保证，此外在加工锚垫板时限位槽的槽深应不小于 2mm，大吨位时限位槽的槽深应适当加深。

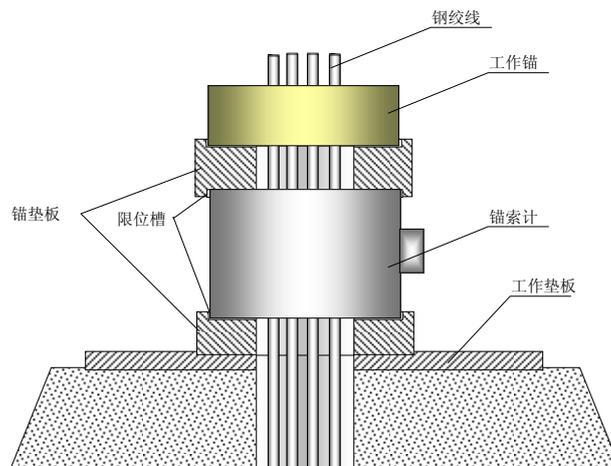


图 14 推荐的锚索计安装方式