

大跨度悬吊式管母挠度控制措施的深化研究

刘菲¹, 李伟², 刘强², 李水旺¹, 刘小刚¹, 陈文洋³

¹中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安

²国网甘肃省电力公司建设分公司, 甘肃 兰州

³中国电建集团四平线路器材有限公司, 吉林 四平

收稿日期: 2023年1月27日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月28日

摘要

近年来, 随着大跨度悬吊式管母在各电压等级变电站中的广泛应用, 管母挠度过大所带来的问题愈发突出。依托某750 kV变电站, 针对大跨度悬吊式管母挠度过大问题, 建立三维有限元模型计算管母挠度、场强, 采用综合对比分析、理论计算结合真型试验的方法, 提出了一种新型管母悬吊系统, 即V型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统, 并研发了相关金具。结果表明, V型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统较现行方案, 可大幅降低间隔内及相邻间隔悬吊点之间的管母挠度, 使其小于0.5 D (D为管母外径), 同时具有场强可控、结构简单、便于施工等优势。以该750 kV变电站为例, 可节约750 kV管母金具投资28%左右。V型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统及其特制金具的研究成果, 为后续具有大跨度悬吊式管母工程提供技术支持, 具有广阔的应用空间和良好的社会效益。

关键词

悬吊式管母, 挠度控制, V型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统, 仿真计算, 真型试验

In-Depth Study on Deflection Control Measures of Long-Span Suspended Tubular Busbar

Fei Liu¹, Wei Li², Qiang Liu², Shuiwang Li¹, Xiaogang Liu¹, Wenyang Chen³

¹China Northwest Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an Shaanxi

²State Grid Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou Gansu

³Power China Siping Power Line Hardware Corporation, Siping Jilin

Received: Jan. 27th, 2023; accepted: Feb. 17th, 2023; published: Feb. 28th, 2023

Abstract

In recent years, with the wide application of long-span suspended tubular busbar in substations of various voltage levels, the problem of excessive deflection of tubular busbar has become more and more prominent. In this paper, relying on a 750 kV substation, aiming at the problem of excessive deflection of the long-span suspended tubular busbar, a three-dimensional finite element model is established to calculate the deflection and field strength of the tubular busbar, and a new type of tubular busbar suspension system is proposed by means of comprehensive comparative analysis, theoretical calculation and true-type testing, namely, V-shaped insulator string with double-sided auxiliary cable tubular busbar suspension system. And related fitting is developed and manufactured. Compared with the current solution, the tubular busbar deflection in the interval and between the suspension points of adjacent intervals can be greatly reduced to less than 0.5 D (D is the outer diameter of the tubular busbar), and it has the advantages of controllable field strength, simple structure, and convenient construction. Taking a 750 kV substation as an example, it can save about 28% of the investment in the tubular busbar fittings. The research results of the V-shaped insulator string plus double-sided auxiliary cable suspension system and its special fittings provide technical support for the subsequent construction of long-span suspended tubular busbar projects, and it has broad application space and excellent social benefits.

Keywords

Suspended Tubular Busbar, Deflection Control, Tubular Busbar Suspension System with V-Shaped Insulator Strings and Double-Sided Auxiliary Cables, Simulation Calculation, True Type Test

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

根据国家电网运检(2015) 902号《国家电网公司关于印发户外GIS设备伸缩节反事故措施和故障分析报告的通知》的要求,对日温差超过25 K(K:开尔文,为热力学温度单位)的地区,在电网规划阶段建议不选用户外气体绝缘全封闭组合电器(简称GIS)。因此对于日温差较大的站址,推荐选用户外气体绝缘混合封闭组合电器(简称HGIS)或户内GIS,其中户内GIS土建投资较大,若站址用地不受限,应优选户外HGIS。户外HGIS母线不装于气室内,多采用悬吊式管母。目前,悬吊式管母已作为国网通用设计220~750 kV屋外配电装置的标准母线形式[1]。结合系统落点,一些变电站站址位于高海拔地区,因带电距离要求,配电装置间隔宽度在原通用设计基础上有所增加[2]。因此,大跨度悬吊式管母布置形式的应用越来越广泛,管母挠度增加所带来的问题也越来越多[3][4][5]。

对于支持式管型母线(简称管母),若管母挠度过大,热胀冷缩时,会引起滑动金具工作失常。因此,规范要求跨中挠度不大于0.5~1.0 D(D为管母外径)。对于悬吊式管母,管母两端用金具悬吊起来,是固定连接,若管母挠度过大,会产生如下问题:1)若母线侧采用垂直伸缩式隔离开关,会造成隔离开关静触头偏移量过大,隔离开关无法正常开合;2)悬吊式管母对其下电气设备的带电距离紧张;3)悬吊式管母弯曲过于明显,致使工程美观性降低[6][7][8]。

针对大跨度悬吊式管母挠度过大问题,国内外普遍解决方法如下:1)增加构架,缩小管母跨度,可有效解决管母挠度问题,该方案致使全站用钢量大幅增加,经济性较差[9][10]。2)管母两端增加配重,以改善管母挠度,该方法因管母较长,增加配重后产生弯矩较小,无法明显改善大跨度管母的跨中挠度,因此通常仅作为辅助措施。3)设计特制金具,通过金具改善管母挠度[11]。目前,已有的特殊金具需配套采用特制管母悬吊金具、管母连接金具,金具费用较高,施工便利性较差,同时管母挠度控制效果过于依赖施工工艺[12]。

依托某 750 kV 变电站,针对大跨度悬吊式管母挠度过大问题,综合分析多种挠度控制措施,提出了一种新型管母悬吊系统,并通过仿真计算、真型试验等方式验证其有效性,从而达到将大跨度悬吊式管母挠度控制在小于 1.0 D (D 为管母外径)的目标。

2. 大跨度悬吊式管母挠度控制措施分析

2.1. 依托工程简介

某 750 kV 变电站站址自然地面标高约 1940.00~1920.00 m,750 kV 配电装置采用户外 HGIS 设备,设置悬吊式管母。

750 kV 悬吊式管母相关参数如表 1 所示:

Table 1. Tube bus parameters

表 1. 管母参数

序号	参数名称	参数值
1	管母型号	铝镁硅合金管母 6Z63-300/276
2	运行电压	750 kV
3	海拔高度	≤2000 m
4	间隔宽度	48 m 和 42 m 两种
5	构架形式	单钢管柱配格构式横梁

为避免管母挠度过大所引发的问题,要求 750 kV 悬吊管母间隔内跨中管母挠度、及相邻间隔悬吊点之间的管母挠度需控制在 0.5 D (D = 300 mm)以内。

2.2. 控制措施分析

1) 有效降低管母挠度的金具连接体系研究

金具连接体系主要从延长悬吊点位置的角度出发,以缩短管母跨度,从而改善管母挠度[13][14]。750 kV 耐张绝缘子串的串长长约 11 m,水平方向投影约 9 m。因此,除间隔内管母挠度较大外,两个相邻间隔悬吊点之间的管母长度也达到近 20 m,可通过整个悬吊体系控制间隔内及相邻间隔管母的挠度。

2) 悬挑型构架横梁挂点设计

在常规构架梁的基础上,设计一种构架横梁挂点前伸的结构,使得管母 V 串悬吊点前移,以实现减小管母挠度的目的。类似结构在部分工程 500 kV 构架、330 kV 构架已有实践,以解决带电净距的问题,有成熟的设计和运行经验。由于 750 kV V 型耐张绝缘子串需在每一相前设置 2 个挂点,因此该方案对于 750 kV 构架经济性和美观性不足。

3) 多根管母并列架设结构设计

硬导体除了可采用单根大直径圆管,也可采用多根小直径圆管组成分裂结构。分裂结构的多根管母

之间增加类似间隔棒的硬型支撑金具，理论分析对管母挠度有一定改善，同时分裂结构对电晕也有一定改善作用。但多根管母分裂布置，会造成现场管母悬吊施工困难，金具配置也较复杂。

综上所述，研究能有效降低管母挠度的金具连接体系具有非常重要的意义。

3. V型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统

3.1. 设计方案

从缩短管母跨度以改善管母挠度的角度出发，结合现场施工便利性的需求，同时兼顾考虑本间隔及相邻间隔管母挠度过大问题，提出一种采用V型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统，如图1所示。该悬吊系统主要特性如下：1) 包括三点悬吊金具、跳线金具和绝缘子串；2) 绝缘子串上端与构架横梁挂点相连，下端与三点悬吊金具的主悬吊结构上挂孔相连，并通过塔楼式挂点金具紧固管母；3) 三点悬吊金具的双侧辅助拉索悬吊结构平行于管母方向延伸至主悬吊结构两侧，并通过拉紧挂点紧固管母，其长度可通过延长拉杆调节；4) 相邻间隔管母之间采用跳线线夹连接，并在跳线线夹两侧内部增加线配重，从而改善跨中挠度。

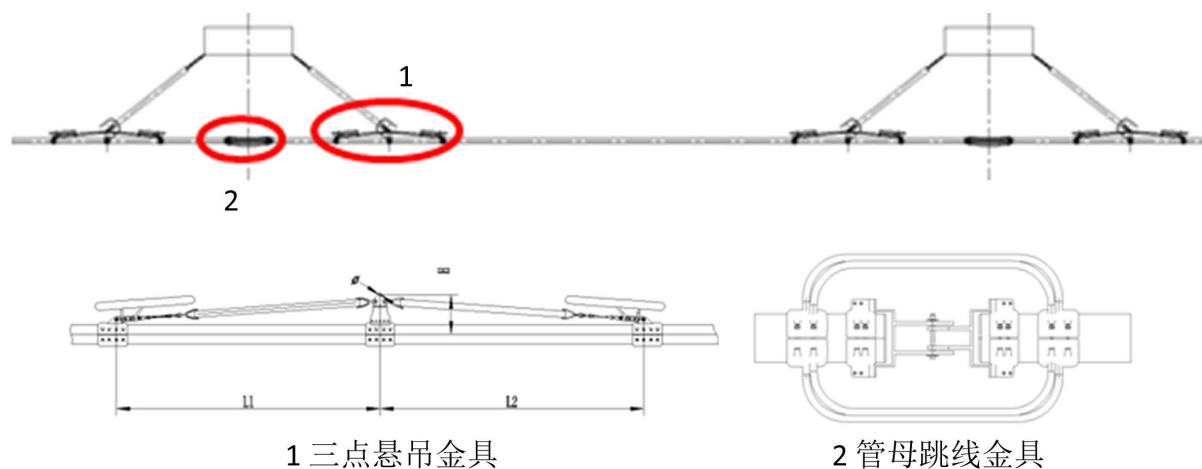


Figure 1. Pipe bus suspension system with V-shaped insulator string and auxiliary cables on both sides

图 1. V型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统

3.2. 理论分析计算

3.2.1. 悬吊系统结构形式的整体分析

正常情况下，管母的挠度出现于悬吊点中部，通过在两端增加合适的配重再加以调平，但由于管母端部有跳线、引下线，且两挂点中间的引下线不居中等原因，在配平过程中可能会引起中部产生向上的挠度。若挠度超出要求的范围，则较难处理。因此，整体结构的理想状态是管母线两挂点中间有一个合理的挠度，用以作为安装裕度，安装后在管母两端用配重调平。同时，管母两挂点间的引下线如不在管母线中部(例如间隔内 A、C 相)，导致管母线两侧挂点受力不均，为保持整体的受力平衡，管母线会向一侧偏移。

在结构设计时需避免的主要问题如下：加载引下线后，由于引下线的位置不对称，导致管母向一侧倾斜；安装引下线、跳线后，同时对管母进行配平，管母中部的挠度为负。为避免上述问题，在设计前，需对其整体构成进行定性分析。

1) 母线向一侧倾斜的问题

由于引下线不在管母的中心位置，引起两侧受力不平衡，管母向一侧倾斜，如图 2 所示。此时，需用一定的配重加在上翘的一端将两端压平，其受力状态如图 3 所示：



Figure 2. Photo of the tubular busbar tilted to one side

图 2. 管母线向一侧倾斜照片

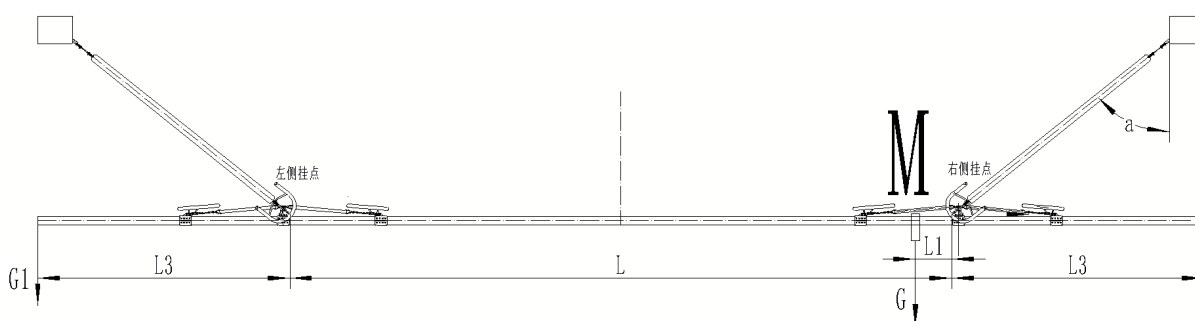


Figure 3. Force diagram of the tubular busbar inclined to one side

图 3. 管母线向一侧倾斜受力状态图

当在 M 点挂接的引下线重为 G 时，为使其不向一侧倾斜，则需在相反的一侧加载重物 G_1 ，以消除管母向一侧倾斜的问题(与挠度无关)，其具体关系如下：

由 M 点引下线引起的向下拉力 G 分别作用在图中左右两个挂点上，产生的力 $F_{左G}$ 和 $F_{右G}$ 分别为：

$$F_{左G} = (L_1/L) * G \quad (1)$$

$$F_{右G} = ((L - L_1)/L) * G \quad (2)$$

由左侧配重引起的向下拉力 G_1 分别作用在图中左右两个挂点上，产生的力 $F_{左G1}$ 和 $F_{右G1}$ 分别为：

$$F_{左G1} = ((L_3 + L)/L) * G_1 \quad (3)$$

$$F_{右G1} = -(L_3/L) * G_1 \quad (4)$$

如保持两侧平衡，则需两侧挂点受力重新平衡，即：

$$F_{左G} + F_{左G1} = F_{右G} + F_{右G1} \quad (5)$$

因此，要想保持整体平衡，则需在左侧增加配重 G_1 ：

$$G_1 = ((L_2 * L_1)/(L + 2 * L_3)) * G \quad (6)$$

2) 控制管母中部向上拱起的问题

管母在应用时，其上有跳线、引下线、倾斜回调的配重等产生的外力，当这些力达到一定值时，会导致管母中部产生一个向上的挠度。为解决管母线挠度向上拱起的问题，先对整个悬吊系统进行定性分析。首先分析悬吊管母用绝缘子串在构架上架点处的受力，其具体状态如图 4 所示。

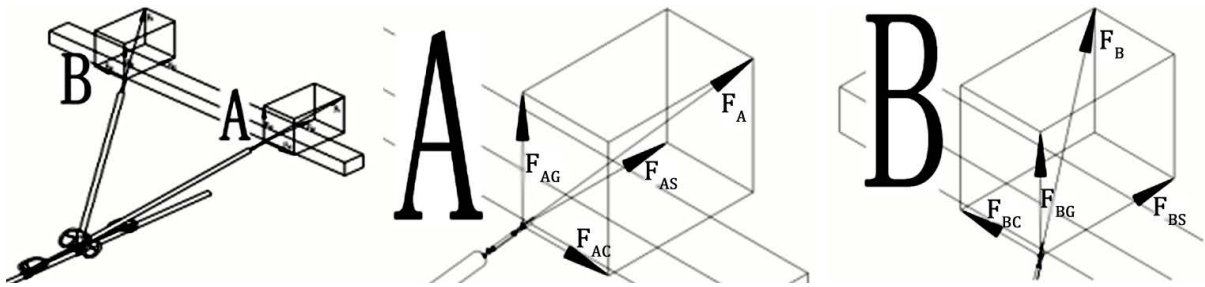


Figure 4. Force diagram of the insulator string at the hanging point on the frame
图 4. 绝缘子串在构架上挂点处的受力状态图

A 点和 B 点的绝缘子挂点拉力 F_A 和 F_B 可分解为与地面和管母轴线垂直或平行的三个分力。因管母两侧及左右是对称布置，所以 F_{AC} 与 F_{BC} 两个力相互抵消， F_{AG} 和 F_{BG} 为绝缘子、管母及金具等所有悬挂件重力的 1/4。C 点和 D 点的情况与 A 点和 B 点相同。

跨线的整体受力、管母线挂点处受力、管母线整体结构示意图如图 6~7 所示。

E 点轴螺栓的受力有一个水平分力 F_{ES} ，其大小为：

$$F_{ES} = F_{AS} + F_{BS} = \text{TANG}(a) * G/2 \tag{7}$$

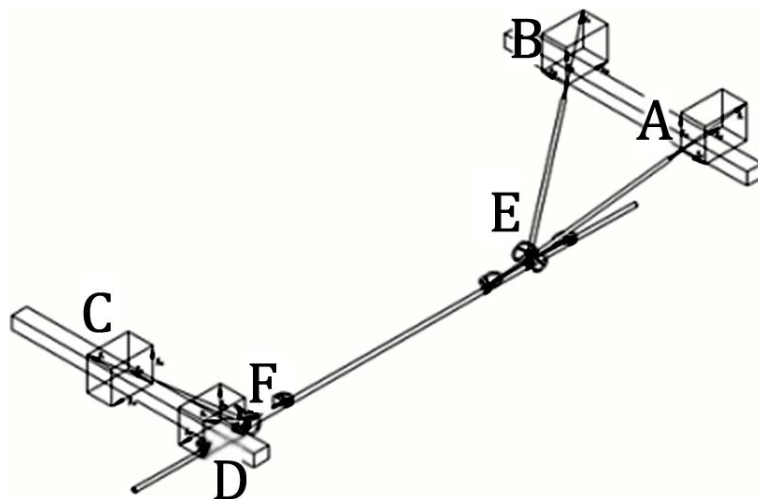


Figure 5. Cross-line force diagram
图 5. 跨线受力图

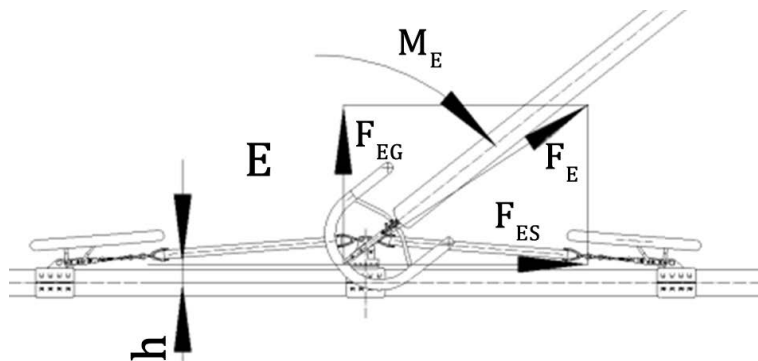


Figure 6. Force diagram of the hanging point of the tubular busbar
图 6. 管母线挂点受力图

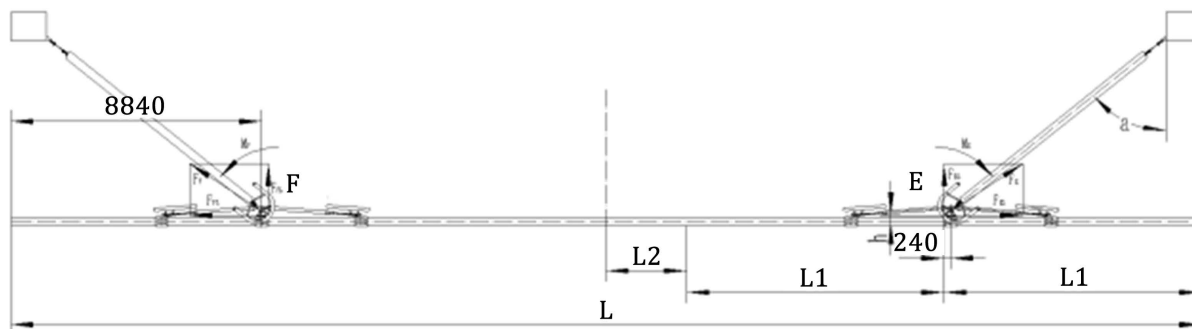


Figure 7. Tubular busbar structure diagram

图 7. 管母线结构图

G : 绝缘子、管母及金具等悬挂件重力;

a : 绝缘子挂点处受力方向在平行于管母轴线的垂直面投影角度。

管母两侧挂点的水平分力大小相等, 水平分力 F_{ES} 会产生一个弯距 M_E :

$$M = M_F = M_E = F_{ES} * h \quad (8)$$

同时, 跳线(若每侧约为 60 kg)也会在管母端头产生一个与水平分力相同方向的扭距, 若无引下线, 则需 L_2 段管母产生的下压力(若管母重力约为 246 N/m)去平衡。平衡规律:

$$(L_1 + L_2/2) * L_2 * 246 \geq M + L_1 * 60 * 9.8 \quad (9)$$

综上所述, 在无引下线时, 整个管母线中间部位的挠度会是一个向下的挠度。

3.2.2. 悬吊系统设计方案

1) 悬吊系统设计原则

a) 应具有良好的电气性能, 满足通流要求。额定电压 750 kV, 最高运行电压 825 kV, 额定电流 5000 A。

b) 强度可靠、力学性能良好, 满足变电工程力学要求。强度安全系数应满足: 正常运行时不得小于 4.0, 安装检修或其他短路状态时不得小于 2.5。

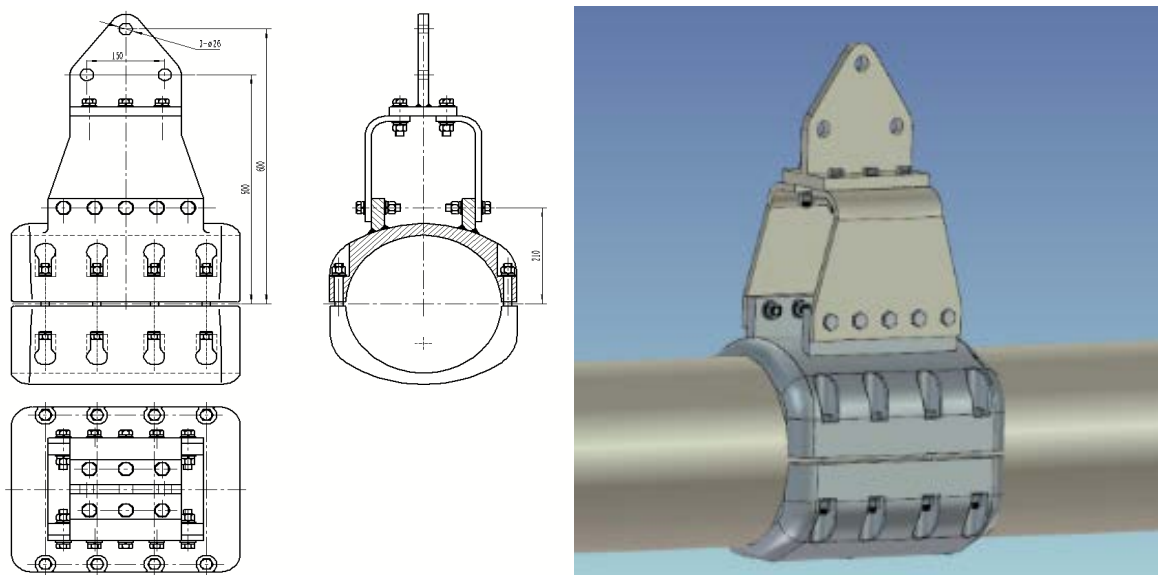


Figure 8. Structure diagram of the tower support fittings of the tubular busbar

图 8. 管母线塔架支撑金具结构图

c) 在晴天夜晚、工频电压(635.1 kV)下, 无可见电晕。无线电干扰水平控制在 $1000 \mu\text{V}$ 以下。电晕损失应小于同长度导线损失的能量。

d) 满足相关国家标准、行业标准及规范要求, 结构合理, 避免损伤导线; 重量轻, 便于安装施工。

e) 接续电阻不应大于等长导线电阻值。

f) 线夹对导线的握力: 承受全张力的接续金具(耐张线夹等)对导线的握力, 应不小于导线拉断力的 65%, 不承受全张力的接续金具(设备线夹等)对导线的握力, 应不小于导线拉断力的 10%。

2) 管母三点悬吊金具的结构设计

a) 管母塔架支撑金具的结构设计。

管母塔架支撑金具的主要功能是用于八字形塔架的支撑点, 同时作为管母的悬吊点。其具体结构型式如图 8 所示。

为了便于调节挂点的高度, 在此基础上进行优化, 增加高度调节机构, 如图 9 所示。



Figure 9. Structure diagram of height adjustment mechanism

图 9. 高度调节机构结构图

3) 管母拉线固定金具的结构设计

管母拉线固定金具主要功能是用于管母三点悬吊金具八字型塔架的拉线点。其具体结构型式如图 10 所示。

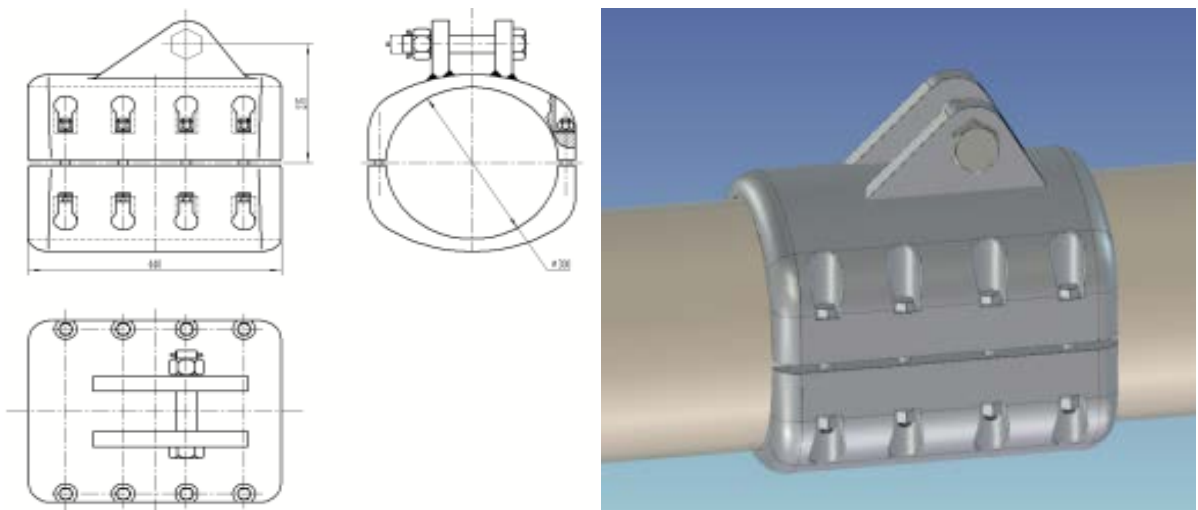


Figure 10. Structure diagram of the fixing fittings of the tubular busbar

图 10. 管母线拉线固定金具结构图

4) 管母三点悬吊金具的双侧辅助拉索结构设计

管母三点悬吊金具的双侧辅助拉索结构，将“管母线塔架支撑金具”、“管母拉线固定金具”等按前述最有利于降低悬吊管母挠度的结构形式连接起来，组成八字型塔架。其具体结构型式如图 11 所示。

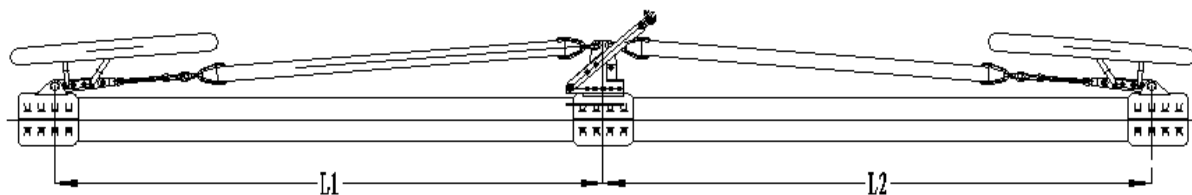


Figure 11. Structure diagram of the double-sided auxiliary cable for the three-point suspension hardware of the tubular busbar
图 11. 管母三点悬吊金具的双侧辅助拉索结构图

管母三点悬吊金具的双侧辅助拉索结构由屏蔽环、拉板、花栏螺栓、U 型挂环、延长拉杆五种金具组成。安装时通过花篮螺栓对管母侧接线串进行预紧后的长度调节。屏蔽环可对管母拉线固定金具、拉板、花栏螺栓、U 型挂环、延长拉杆的接头进行电气屏蔽。延长拉杆本体具有足够的机械强度，采用钢管制造，能防止自身电晕。

5) 悬吊式管母 V 型绝缘子串的结构设计

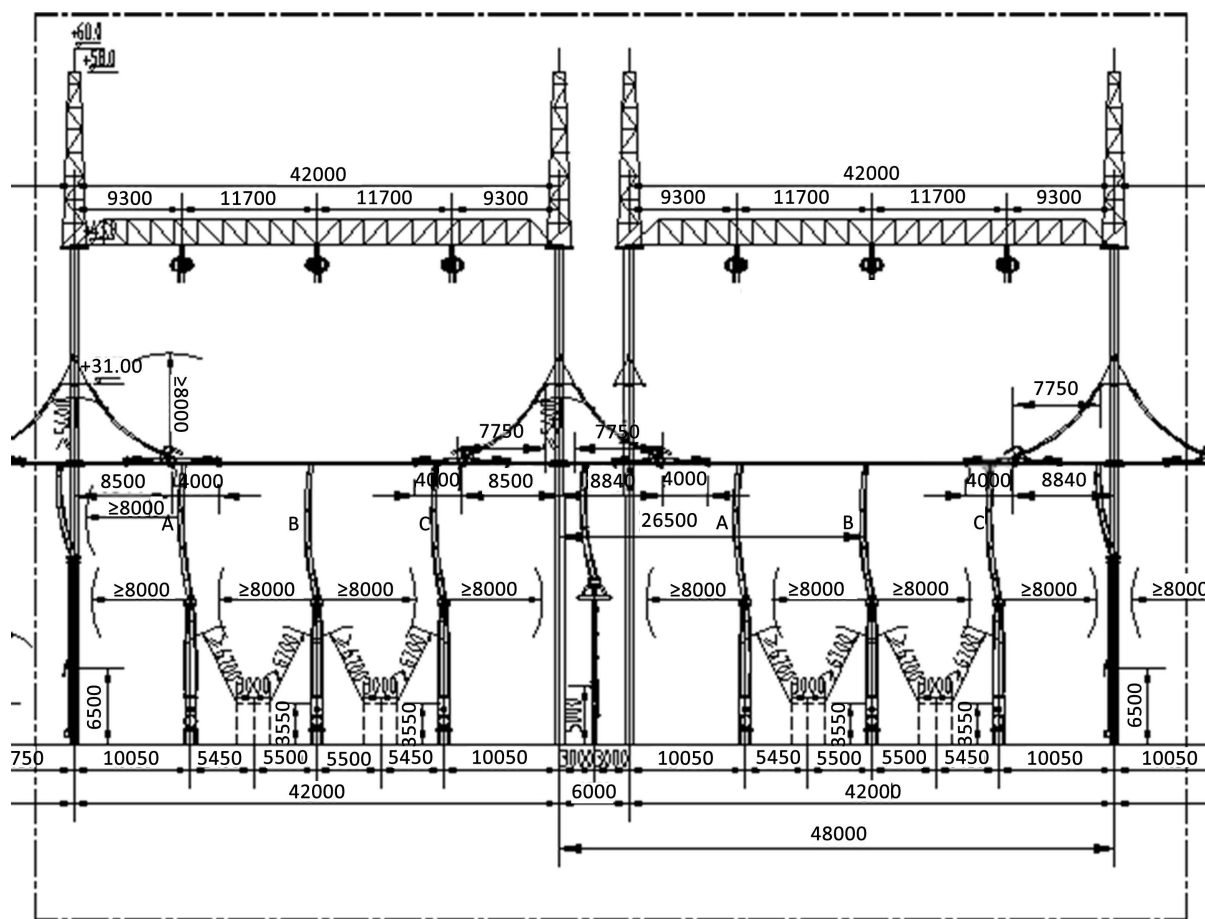


Figure 12. Sectional diagram of a typical 750 kV busbar partition in a substation
图 12. 某站典型 750 kV 母线间隔断面

对于悬吊式管母 V 型绝缘子串,可采用工程中已有应用经验的绝缘子串,对其挂接孔进行调整,与管母三点悬吊金具连接。屏蔽环尺寸应保证其屏蔽范围。

3.2.3. 悬吊系统仿真计算

为验证结构设计的可行性,对整个结构的挠度和场强进行了 COMSOL 三维有限元仿真计算[15][16]。

以某站典型 48 m 母线间隔跨作为计算输入条件,采用 V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统,如图 12 所示。

1) 管母挠度仿真计算

a) 未配重状态下管母位移最大值为 133 mm;

b) 随着配重重量的增加,管母位移最大值呈先减小后增大趋势,最大值由管母中间位置移向端部两侧;

c) 配重约 80 kg 时挠度最小。

2) 悬吊系统电场分布仿真计算

a) 各悬吊绝缘子均压环、管母抱夹、跳线线夹表面电场强度最大值出现在沉孔边沿倒角处,数值小于 2.3 kV/mm;

b) 跳线连接板边沿、连接板螺栓表面电场强度最大值超过 2.3 kV/mm,当倒角大于 4 mm 时,可降至 2.0 kV/mm 以内。

3.3. 真型试验验证

以某站典型 48 m 母线间隔跨采用 V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统作为试验基础数据。选择水准仪作为测量工具,在试验中对管母线的挠度进行测量[17][18]。

试验内容及方法

1) 试验准备

a) 准备试验场地及试验用挂点;

b) 采购铝镁硅合金管母 6Z63-300/276;

c) 研制 V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统相关金具;

d) 准备光学发光器、水平测量仪等测量工具。

2) 试验挂接参数

管母长度 46 m,挂点距离 48 m;管母悬吊点到挂点中点 7.84 m(模拟到构架中心为 8.84 m);四个挂点到管母线的垂直距离为 6.5 m;同一侧挂点间的距离 7.06 m。管母线三点悬吊金具的八字型塔架每侧为 3.5 m 和 4 m 时,对比常规方案(无八字型塔架结构)分别进行试验,管母线三点悬吊金具吊点到管母线中心的距离为 0.6 m,具体尺寸详见图 13、图 14。

3) 试验方法及测量位置

试验时,模仿实际工程中的安装状态进行挂接。挂接后主要对管母线的无挂载状态、及有挂载(模拟引下线)并调平后状态的挠度进行测量并记录。对管母两端及中间、挂点及八字型的挂点处、挂载(模拟 A、C 相引下线)进行测量,测量的点位如图 15 所示。

其中 1、5 点为管母的两个端点,2、4 点为管母的两个悬挂点;21、22、41、42 为管母三点悬吊金具的八字型塔架悬吊点;3 点为管母中点;31 点为 A、C 项的引下线的下位置,当测试 B 项(管母线中点)引下线时,不测量此点。

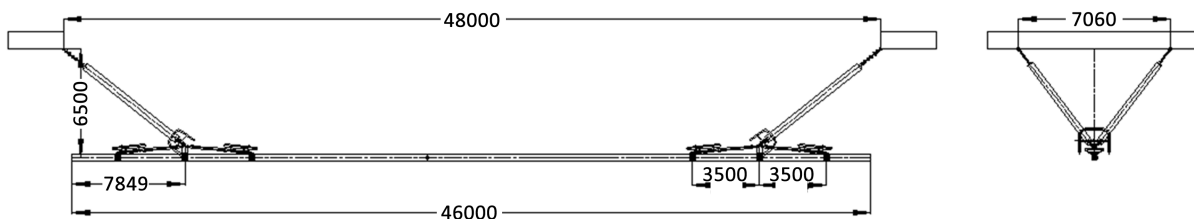


Figure 13. Schematic diagram of the attachment when the span is 48 m and each side of the figure-eight tower is 3.5 m
图 13. 跨距 48 m 且八字型塔架每侧为 3.5 m 时的挂接示意图

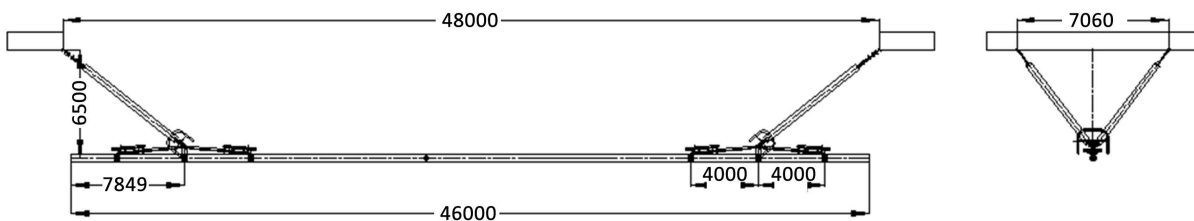


Figure 14. Schematic diagram of the attachment when the span is 48 m and each side of the figure-eight tower is 4 m
图 14. 跨距 48 m 且八字型塔架每侧为 4 m 时的挂接示意图

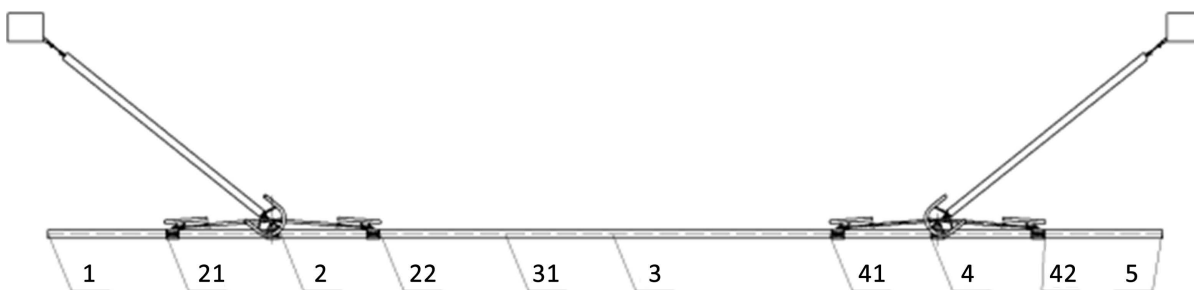


Figure 15. Schematic diagram of measurement location
图 15. 测量位置示意图

调平时在 1 点和 5 点安装适当的配重，将整个管母各点高差调节到最小。多次试验后，当 1、3、5 点调整到同一高度时，整体管母的视觉效果最好且实际挠度降到最小。

4) 试验方案

为对比管母三点悬吊金具八字型塔架侧臂对管母挠度的影响，试验中对不同状态进行了测试。

第 1 种状态是管母三点悬吊金具设置双侧八字型塔架侧臂，其结构如图 16 所示。

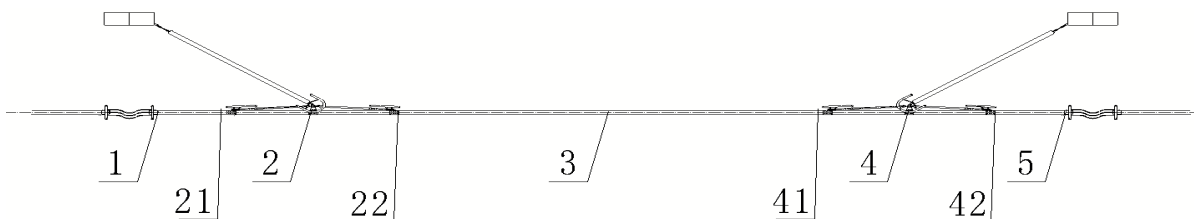


Figure 16. Schematic diagram of the side arm of the double-sided figure-eight tower with the three-point suspension fittings of the tubular busbar
图 16. 管母三点悬吊金具设置双侧八字型塔架侧臂示意图

第 2 种是撤掉 21、42 两点的侧臂(八字撤一侧)，其结构如图 17 所示。

第 3 种是撤掉 21、22、41、42 四点的侧臂(八字撤两侧，即为常规方案)，其结构如图 18 所示。

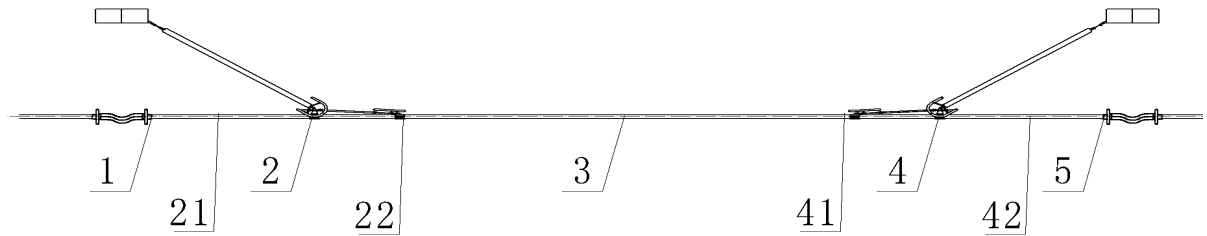


Figure 17. Schematic diagram of the side arm of the three-point suspension fittings of the tubular busbar with the two points 21 and 42 removed

图 17. 管母三点悬吊金具去掉 21、42 两点的侧臂示意图

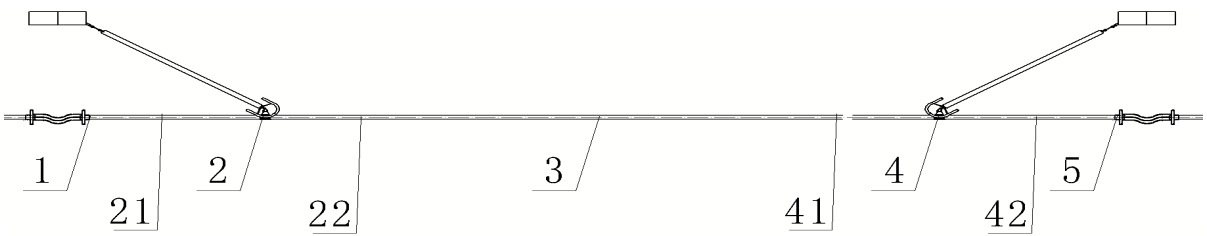


Figure 18. Schematic diagram of the side arm of the three-point suspension fittings of the tubular busbar with the two points 21, 22, 41 and 42 removed

图 18. 管母三点悬吊金具去掉 21、22、41、42 两点的侧臂示意图

5) 管母变形量的计算方法

管母挠度的测量值只能说明配平后，管母相对与水平线的实际位移，并不代表管母线本身的实际变形量。

为准确体现管母的实际变形量，可按水平线的测量高差得到多个测量点，并以 2、4 的测量点作一直线，作为变形基准线，计算出变形基准线到测量点之间的距离，作为管母线的实际变形状态指标，如图 19 所示。其中，2、4 点处是悬挂点，作为变形量为 0 的基准点。

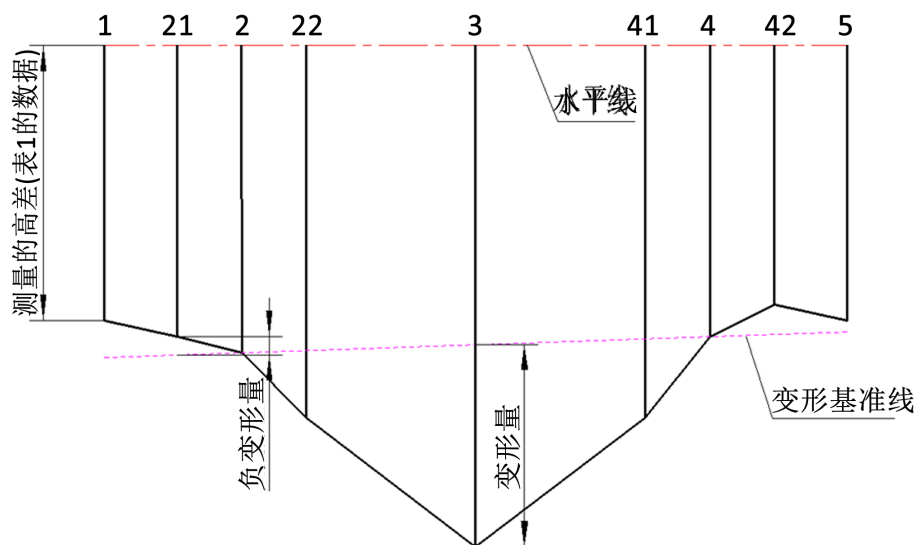


Figure 19. Diagram of the method for calculating the deformation of the tubular busbar

图 19. 计算管母线变形量的方法图

图 16 中的水平线即为测量时水准仪的观察平面，测量的高差即为实际测量值。管母相对于 2、4 点

连线的挠度向下时, 变形量为正值, 挠度向上时, 变形量为负值。

6) 试验数据分析

管母三点悬吊金具设置双侧八字型塔架侧臂, 每侧臂延伸 3.5 m。侧臂的八字撤一侧、八字撤两侧(即为常规方案一), 测量数据详见表 2:

Table 2. Deflection measurement data sheet of tubular busbar (arm extension 3.5 m on each side) mm
表 2. 管母挠度测量数据表(每侧臂延伸 3.5 m)

序号	位移量 1	位移量 21	位移量 2	位移量 22	位移量 31	位移量 3	位移量 41	位移量 4	位移量 42	位移量 5	最大位 移	工况
1	86.7	37.8	0	-2.8		58.5	-0.2	0	24.2	65.3	86.7	两侧臂延伸至 3.5 m; 左侧配重 70 kg, 右侧配重 80 kg; 中间负重 160 kg; 测力 1191 kg
2	71.5	30.8	0	1.2		76.7	-0.2	0	19.2	55.3	76.7	两侧臂延伸至 3.5 m; 左侧配重 70 kg, 右侧配重 80 kg; 中间负重 200 kg; 测力 1221 kg
3	43.6	17.3	0	12.7	29.9	51	-10.7	0	34.7	88.5	88.5	两侧臂延伸至 3.5 m; 左侧配重 20 kg, 右侧配重 80 kg; 1 点 15 米处负重 200 kg; 测力 1207 kg
4	87.9	26.2	0	2.8		83	6.21	0	23.8	72.1	87.9	两侧臂延伸至 3.5 m; 撤掉外侧臂(21、42 点); 左侧配重 90 kg, 右侧配重 80 kg; 中间负重 160 kg; 测力 1115 kg
5	89.4	31.8	0	8.2		92.5	8.8	0	18.2	68.6	92.5	两侧臂延伸至 3.5 m; 撤掉外侧臂(21、42 点); 左侧配重 100 kg, 右侧配重 90 kg; 中间负重 200 kg; 测力 1143 kg
6	43.3	12.2	0	16.8	44	74	-2.8	0	32.8	94.7	94.7	两侧臂延伸至 3.5 m; 撤掉外侧臂(21、42 点); 左侧配重 45 kg, 右侧配重 90 kg; 1 点 15 米处负重 200 kg; 测力 1125 kg
7	94.3	36	0	4		106	9	0	29	82.7	106	两侧臂延伸至 3.5 m; 撤掉 两侧臂 (21、22、41、42 点); 左侧配重 80 kg, 右侧配重 70 kg; 中间负重 200 kg; 测力 1008 kg

由表 2 可知:

- 跨中心荷载越大, 跨中挠度越大;
- 相对跨中荷载, 配重若过大, 会造成挠度最大点转移到配重处;
- 跨中荷载向边侧偏移时, 对跨中挠度有利, 但对另一侧端头挠度的改善贡献较小;

- d) 撤掉三点悬吊金具外侧臂，挠度明显增大，且挠度最大点出现在两侧相邻间隔管母连接处；
- e) 撤掉三点悬吊金具两侧臂，即为常规方案，挠度进一步增大，挠度最大点在跨中。

管母三点悬吊金具设置双侧八字型塔架侧臂，每侧臂延伸 4.0 m。侧臂的八字撤一侧、八字撤两侧(即为常规方案一)，测量数据与侧臂延伸 3.5 m 数据进行对比分析详见表 3 和图 20。

Table 3. Comparison table of deflection measurement data of tubular busbar mm
表 3. 管母挠度测量数据对比表

序号	最大位移		工况
	每侧延伸 4.0 m	每侧延伸 3.5 m	
1	44.3	86.7	左侧配重 70 kg，右侧配重 80 kg；中间负重 160 kg；测力 1191 kg
2	42.3	76.7	左侧配重 70 kg，右侧配重 80 kg；中间负重 200 kg；测力 1221 kg
3	56.8	88.5	左侧配重 20 kg，右侧配重 80 kg；1 点 15 米处负重 200 kg；测力 1207 kg
4	85	87.9	撤掉外侧臂(21, 42 点)；左侧配重 90 kg，右侧配重 80 kg；中间负重 160 kg；测力 1115 kg
5	87	92.5	撤掉外侧臂(21, 42 点)；左侧配重 100 kg，右侧配重 90 kg；中间负重 200 kg；测力 1143 kg
6	89.3	94.7	撤掉外侧臂(21, 42 点)；左侧配重 45 kg，右侧配重 90 kg；1 点 15 米处负重 200 kg；测力 1125 kg
7	99.4	106	撤掉两侧臂(21, 22, 41, 42 点)；左侧配重 80 kg，右侧配重 70 kg；中间负重 200 kg；测力 1008 kg

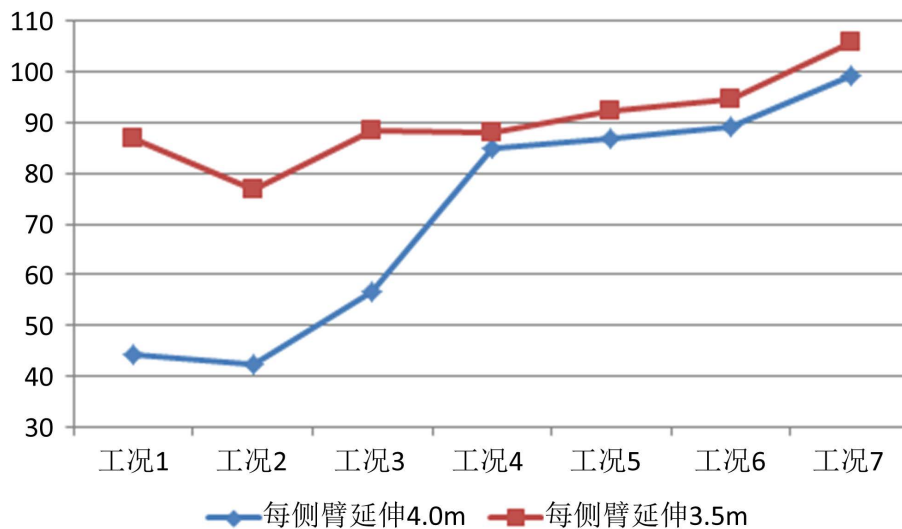


Figure 20. Comparison diagram of deflection measurement data of tubular busbar
图 20. 管母挠度测量数据对比图

通过上述对比可知：

- a) 对于 48 m 跨间隔的 6Z63-300/276 管母，三点悬吊金具侧臂延伸至 3.5 m 或 4.0 m，均可保证 48 m 跨间隔挠度降低至 0.5 D (150 mm) 以内；
- b) 三点悬吊金具侧臂延伸越长，对管母挠度越有利；
- c) V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统，较常规设计方案，悬吊管母挠度可降低约 38.3%；
- d) 结合管母挠度、该悬吊系统受力分析、经济性等因素综合考虑，建议该站 750 kV 母线采用的 V

型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统，两侧臂延伸 4.0 m 为最优。

3.4. 经济性分析

以上述某 750 kV 变电站建设规模为例，对 750 kV 管母金具采用现行方案和改进方案进行经济性对比，详见表 4。

Table 4. Economic comparison of 750 kV tubular busbar fittings in a 750 kV substation

表 4. 某 750kV 变电站 750 kV 管母金具经济性对比表

项目	现行方案		研发方案	
	多挂点组合金具	特制跳线金具	三点悬吊金具	管母跳线金具
单价/元	6330	12,112	8700	6500
套数/套	132	102	132	51
总价/万元	207.1		148.0	

由表 4 可知，该悬吊系统金具单价低于现普遍采用的特制金具 18% 左右，且跳线金具用量节约一半。以某 750 kV 变电站为例，可节约费用 28% 左右。

4. 结论

本文针对大跨度悬吊式管母挠度过大问题，依托实际工程，综合分析多种控制措施，提出一种新型管母悬吊系统：基于 V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统，并开发相关金具。通过建立三维有限元计算模型和现场开展真型试验，得到如下结论：

- 1) 基于 V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统可实现“大幅降低间隔内跨中管母挠度、及相邻间隔悬吊点之间的管母挠度至 0.5 D (D 为管母外径) 以内”的目标。
- 2) 基于 V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统具有场强可控、结构简单、便于施工、利于工程创优等优势。以某 750 kV 变电站为例，可节约 750 kV 管母金具投资约 28%，经济性高。
- 3) 基于 V 型绝缘子串加双侧辅助拉索的管母悬吊系统具有普遍的推广价值和良好的社会效益，可为后续大跨度悬吊式管母工程建设提供重要的技术支持。

参考文献

- [1] 刘菲, 张健, 常伟. 大跨度管型母线挠度的计算及控制方式研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(9): 69-71.
- [2] 李学鹏, 李庆军, 薛峰, 等. 青豫直流工程入地电流对青海地区交流电网直流偏磁的影响[J]. 广东电力, 2021, 34(10): 83-88.
- [3] 张晓兵, 吕江. 500kV 黄坪变电站悬挂式管母施工方案[J]. 山东工业技术, 2014(20): 97.
- [4] 毛生海, 童仕忠. 750kV 变电站双跨悬吊式管型母线有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(7): 86-91.
- [5] 王海菠, 程永锋, 卢智成, 朱祝兵, 章姝俊. 管母支撑滑动金具耦联体系抗震性能[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 12843-12848.
- [6] 解伟. 管型母线的挠度、模态分析及工程安全应用[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [7] 高美金, 赵翰林, 房鑫炎, 王淑红. 单柱双母线背靠背垂直布置方式下管型母线及支持绝缘子应力分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 201-209.
- [8] Sun, Q., Yuan, G., Huang, Y., Shu, Q. and Li, Q. (2018) Structural Behavior of Supported Tubular Bus Structure in Substations under seismic Loading. *Engineering Structures*, **174**, 861-872. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.077>
- [9] 李伟. 管型母线的挠度、模态分析及工程安全应用[J]. 大陆桥视野, 2017(24): 61-62.

-
- [10] 李信, 张锐, 洪海程, 等. 支撑式管母线安装温度对其安全温变范围影响研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 143-149.
 - [11] Partovi, F. and Fanaie, N. 使用两个 V 形预张拉电缆对长钢I型梁桥的挠度控制(英文) [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(2): 260-271.
 - [12] 周锦平, 童仕忠, 吕续国, 尹建明. 一种用于管母线跳线管的新型组合连接金具[P]. 中国专利, CN104538910B. 2017-06-23.
 - [13] 张林波, 王擎忠. 大跨度托梁抽柱挠度控制方法[P]. 中国专利, CN111648618A. 2020-09-11.
 - [14] 陈浩, 张彦军, 郝文海, 等. 220kV 变电站母线悬吊复合绝缘子连接金具腐蚀原因分析[J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39(6): 29-32.
 - [15] 张云翔, 陈昊, 宋恒东, 等. 基于有限元法的绝缘子污闪动态电弧模型研究[J]. 广东电力, 2021, 34(6): 119-126.
 - [16] 邹学东, 张丽萍, 李琦, 苏鹏宇. 基于有限元法的支柱绝缘子应力分析[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 68-73.
 - [17] 彭涛. 基于视觉的管型母线挠度实时监测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
 - [18] 周云, 程依婷. 基于数字图像相关理论的非接触式结构位移测量方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 1-9.