

文章编号:1673-2049(2015)03-0007-06

通信机房走线架悬吊杆布置方式研究

屈文俊,董 浪,朱 鹏

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:基于生命线工程的抗震设防要求,开展了通信机房走线架悬吊杆垂直布置、梯形布置和混合布置下吊挂系统的抗侧性能研究;采用理论方法推导了 3 种布置方式下吊挂系统的抗侧刚度,并采用有限元分析软件 ANSYS 加以验证;对 3 种布置方式下吊挂系统的抗侧刚度进行比较分析。研究表明:悬吊杆垂直布置和梯形布置时走线架吊挂系统抗侧刚度小,主要由重力刚度决定;悬吊杆混合布置时吊挂系统具有较大的初始抗侧刚度;悬吊杆混合布置时吊挂系统满足“小震不坏,大震不倒”的抗震设防要求,是一种比较合理、高效的布置方式。

关键词:通信机房;走线架;吊挂系统;悬吊杆;布置方式;抗侧刚度

中图分类号:TU323 **文献标志码:**A

Research on Cable Tray Suspender Layout in Communication Workshop

QU Wen-jun, DONG Lang, ZHU Peng

(Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the requirements for seismic resistance of lifeline engineering, research on the lateral performance of cable tray suspension systems in communication workshop with vertical, trapezoidal and composite suspender layout was conducted. The lateral stiffness of suspension systems with the three kinds of suspender layouts was derived by theoretical methods and the formulas were verified by finite element analysis software ANSYS, respectively. Then comparison was carried out. The study results show that the lateral stiffness of cable tray suspension systems with vertical and trapezoidal suspender layout is small, which is mainly determined by the gravity stiffness. The initial lateral stiffness against lateral displacement of suspension system with composite suspender layout is much larger. Suspension system satisfies the seismic fortification requirement of “no damage in small earthquake and no collapsing in strong earthquake” in the case of composite suspender layout, which is verified as a more reasonable and efficient layout.

Key words: communication workshop; cable tray; suspension system; suspender; layout; lateral stiffness

0 引 言

走线架吊挂系统通过柔性悬吊杆与主体结构连接,将走线架上的荷载传递到主体结构上。国外走

线架结构主要应用于核电系统,用来承载核电站内电缆的质量,学者对核电站电缆桥架的抗震性能进行了广泛研究^[1-2]。吊挂系统也被应用于建筑结构的抗震减震,理论分析和试验研究表明该系统具有

收稿日期:2014-12-21

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A07-04)

作者简介:屈文俊(1958-),男,河南新乡人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:quwenjun. tj@tongji. edu. cn。

良好的抗震性能,是一种较好的抗震结构^[3-7]。既有通信机房走线架吊挂系统作为吊挂结构的一种,符合自然传力原理,能够充分利用构件的力学性能,其抗侧刚度小,自振周期大,能有效地避开场地的卓越周期,地震作用较小。然而吊挂系统在水平力作用下的水平位移难以得到有效控制^[8-10],从而危及线缆工作。因此需要对吊挂系统的抗侧刚度进行控制,以保证系统的抗震性能和控制结构的侧移在合理的范围内。可以通过在吊挂系统中增加斜拉杆抗侧构件^[11]或设置交叉斜撑改善吊挂系统的抗侧性能,但这 2 种方式均需要设置附加杆件。本文中笔者通过理论方法推导悬吊杆垂直布置、梯形布置和混合布置下吊挂系统的抗侧刚度,并建立有限元模型进行验证。通过分析比较 3 种悬吊杆布置方式下吊挂系统的抗侧性能,提出一种合理、高效的悬吊杆布置方式。

1 悬吊杆垂直布置吊挂系统抗侧性能

1.1 吊挂系统抗侧刚度理论分析

既有通信机房走线架悬吊杆基本上都采用垂直布置,见图 1,其中, M 为悬吊杆间距范围内走线架等效质量, g 为重力加速度, H 为走线架离楼板的距离, B 为走线架桥架宽度。走线架悬吊杆顶部通过适当的方式锚固于结构楼板,桥架通过较短的支撑杆连接成整体,桥架刚度远大于吊杆刚度,可视为无穷刚性杆。悬吊杆端部约束状态介于铰接和刚接之间,现分别按支座铰接和刚接计算吊挂系统的抗侧刚度。

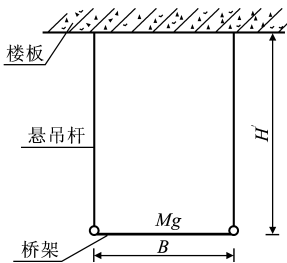


图 1 悬吊杆垂直布置

Fig. 1 Vertical Layout of Suspenders

当支座铰接时,吊挂系统为一摆长为 H 的单摆结构。摆长 H 是吊挂系统周期 T 的惟一参数,其大小为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{H}{g}} \quad (1)$$

吊挂系统抗侧刚度 K 是由走线架重力荷载分力决定的重力刚度^[3],其大小为

$$K = \frac{Mg}{H} \quad (2)$$

由式(2)可知,吊挂系统抗侧刚度 K 与走线架等效质量 M 和摆长 H 有关。

当支座刚接时,悬吊结构计算简图如图 2 所示,其中, F 为水平荷载, D 为侧移。忽略水平荷载 F 力矩的变化,对支座处取矩,则有

$$FH = MgD + \frac{6EI}{H^2}D \quad (3)$$

式中: E 为悬吊杆材料的弹性模量; I 为悬吊杆截面惯性矩。

抗侧刚度为

$$K = \frac{F}{D} = \frac{Mg}{H} + \frac{6EI}{H^3} \quad (4)$$

由式(4)可知,吊挂系统的抗侧刚度是重力刚度和悬臂吊杆抗侧刚度的叠加。屈文俊等对图 2 所示吊挂系统的抗侧性能已进行了研究,通过建立运动微分方程推导了其抗侧刚度,即

$$K = \frac{6Mg}{5H} + \frac{6EI}{H^3} \quad (5)$$

1.2 吊挂系统抗侧刚度数值分析

进行数值分析时,需确定走线架基本数据。假定悬吊杆为圆形截面,直径 $d = 0.01$ m。悬吊杆材料的弹性模量 $E = 206$ GPa, $H = 2.0$ m, $B = 0.6$ m,吊杆间距为 2 m,走线架上等效荷载为 $2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,经计算吊杆间距范围内的走线架等效质量 $M = 400$ kg;考虑悬吊杆顶端刚接,运用 ANSYS 建立有限元模型,进行模态分析。悬吊杆根据实际情况建模,采用 Beam188 单元进行模拟。桥架建模时也采用 Beam188 单元模拟,但截面尺寸取值远大于悬吊杆。为了考虑重力刚度,在进行模态分析前,打开预应力效应开关,先施加重力加速度进行静力求解,再进行模态分析。系统自振频率 $\omega = 2.35 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,抗侧刚度 $K_{A1} = M\omega^2 = 2\,209 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

可以在建立的 ANSYS 模型桥架一端施加水平荷载,计算荷载-侧移曲线,更直观地观察系统的抗侧刚度。施加水平荷载前,先施加重力加速度进行静力求解。悬吊杆垂直布置吊挂系统水平荷载-侧移曲线如图 3 所示。荷载-侧移曲线并不是一条直线,这意味着系统切线抗侧刚度是变化的。随着侧移增大,系统的切线抗侧刚度不断增大,且增长幅度越来越大(图 4),切线抗侧刚度由图 3 中相邻数据点的割线刚度近似计算,抗侧刚度-侧移曲线变化趋

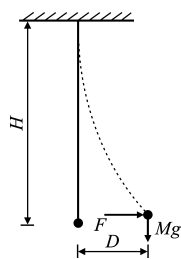


图 2 悬吊结构计算
Fig. 2 Suspension Structure Calculation

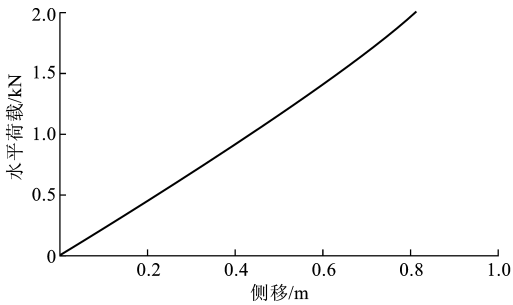


图 3 悬吊杆垂直布置吊挂系统水平荷载-侧移曲线
Fig. 3 Horizontal Load-lateral Displacement Curve of Suspension System with Vertical Suspender Layout

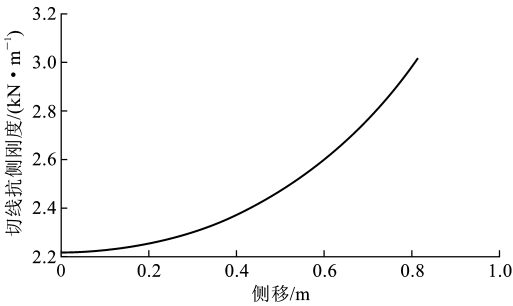


图 4 悬吊杆垂直布置吊挂系统切线抗侧刚度-侧移曲线
Fig. 4 Tangent Lateral Stiffness-lateral Displacement Curve of Suspension System with Vertical Suspender Layout

势可从以下 2 方面进行解释:①由于悬吊杆的弯曲变形,使质量点到悬吊点的距离不断减小,由式(2)可知系统重力刚度不断变大;②悬吊杆可视为悬臂构件,其切线抗侧刚度随着变形的增大而不断增大。

从图 4 可以看出,当侧移较小时,切线抗侧刚度变化较小,即荷载-侧移曲线在侧移较小时近似为直线。模态分析时考虑小变形,且实际工程中吊挂系统不会发生过大变形,可偏小地将零点切线刚度作为系统的抗侧刚度。为计算方便,将 $F=1\text{ N}$ 时的割线刚度作为零点切线抗侧刚度,即系统抗侧刚度。当 $F=1\text{ N}$ 时,侧移 $D=4.53\times10^{-4}\text{ m}$,抗侧刚度 $K_{A2}=F/D=2\,207.5\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,与 ANSYS 模态分析得到的结果非常接近,仅相差 0.07% 。

表 1 为悬吊杆顶端铰接和刚接时吊挂系统抗侧刚度的计算结果。悬吊杆顶端刚接时,根据式(5)计算的抗侧刚度比 ANSYS 分析结果大 9.87% ,而式(4)计算结果比 ANSYS 分析结果小 7.88% ,简化式(4)的计算精度满足工程要求,计算结果偏小。悬吊杆顶端铰接时,系统抗侧刚度比顶端刚接时的 ANSYS 计算结果小 11.27% ,这主要是由于通信机房走线架悬吊杆截面小,其抗弯刚度对系统抗侧刚度的贡献很小,抗侧刚度主要由重力刚度决定。

实际工程中,悬吊杆顶端不能保证刚接,且吊挂

表 1 悬吊杆垂直布置时吊挂系统抗侧刚度计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Lateral Stiffness of Suspension System with Vertical Suspender Layout

| 支座约束状态 | 铰接 | 刚接 | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 式(4) | 式(5) | ANSYS |
| 计算依据 | 式(2) | | | |
| 抗侧刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$) | 1 960 | 2 035 | 2 427 | 2 209 |

注:ANSYS 分析结果取模态分析结果。

系统抗侧刚度主要由重力刚度决定,悬吊杆垂直布置时吊杆系统的抗侧刚度可直接按式(2)进行计算。

2 悬吊杆梯形布置吊挂系统抗侧性能

2.1 吊挂系统抗侧刚度理论分析

悬吊杆梯形布置时悬吊杆与楼板不垂直,可分为正梯形布置[图 5(a)]和倒梯形布置[图 5(b)]。图 5 中, A 为悬吊杆悬吊点间距。

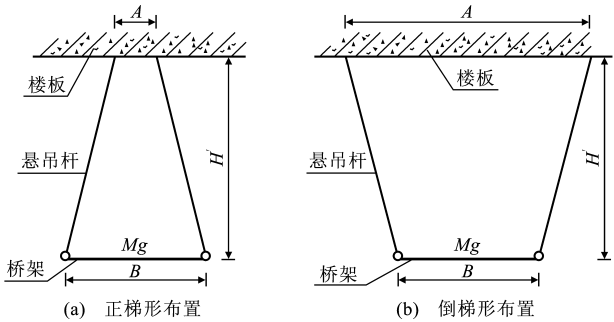


图 5 悬吊杆梯形布置

Fig. 5 Trapezoidal Layouts of Suspenders

支座按铰接处理,为不平行吊挂摆系统。根据机械能守恒定律,可以得到周期 T 为^[4]

$$T=2\pi\sqrt{\frac{H}{g}\cos(\alpha)}\sqrt{\frac{1}{1-(1-\beta)\sin^2(\alpha)}}$$
$$\alpha=\arctan[(A-B)/(2H)]$$
$$\beta=A/B$$

(6)

式中: α 为悬吊杆与铅垂线的夹角。

抗侧刚度 K 为

$$K=M\frac{4\pi^2}{T^2}$$

(7)

不平行吊挂摆系统的周期与悬吊点间距 A 有关。当 $\beta=0$ 时,即 $A=0$,不平行吊挂摆系统退化为物理摆(图 6);当 $\beta=1$ 时,即 $A=B$,为图 1 所示的垂直布置。这 2 种情况下吊挂系统的周期均为 $2\pi\sqrt{H/g}$,将 $\beta=0$ 或

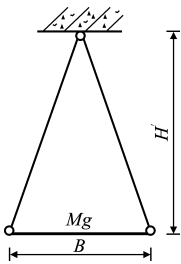


图 6 物理摆

$\beta=1$ 代入式(6),可得到相同的结果。 $B=0.6\text{ m}$, $H=2\text{ m}$ 时,相对周期

$T' = T/(2\pi\sqrt{H/g})$ 随 A 变化而改变的曲线见图 7。由图 7 可知,当 $0 \leq \beta \leq 1$ 时[图 5(a)],改变悬吊点间距对周期影响很小,相对周期变化范围为 $0.998 \sim 1.000$;当 $\beta > 1$ 时[图 5(b)],悬吊点间距增大,周期减小,抗侧刚度增加。设计中可以通过调整悬吊点之间的距离来调整周期和抗侧刚度,优化设计。

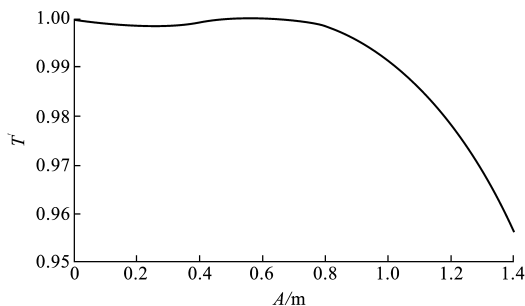


图 7 $T'-A$ 曲线

Fig. 7 $T'-A$ Curve

2.2 吊挂系统抗侧刚度数值分析

悬吊杆悬吊点间距 $A = 1.3$ m,其余数据与第 1.2 节中相同,建立系统的 ANSYS 有限元模型,支座处采用刚接,建模方式和计算方法与第 1.2 节中相同。吊挂系统自振频率 $\omega = 2.41 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,抗侧刚度 $K_{A1} = M\omega^2 = 2\,323.2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。悬吊杆梯形布置吊挂系统水平荷载-侧移曲线如图 8 所示,悬吊杆梯形布置吊挂系统切线抗侧刚度-侧移曲线如图 9 所示。荷载-侧移曲线和切线抗侧刚度-侧移曲线变化趋势与悬吊杆垂直布置时相同,且切线抗侧刚度与悬吊杆垂直布置相比变化程度更大。除了第 1.2 节中分析的 2 个方面原因外,梯形布置吊挂系统在水平荷载作用下会在 2 个悬吊杆中分别产生拉力和压力,阻碍系统的侧向变形,从而使系统切线抗侧刚度进一步增大。与第 1.2 节中相同,为计算方便,近似将 $F = 1 \text{ N}$ 时的割线刚度作为零点切线抗侧刚度,即系统抗侧刚度。当水平荷载 $F = 1 \text{ N}$ 时,侧移 $D = 4.27 \times 10^{-4} \text{ m}$,计算得到抗侧刚度 $K_{A2} = 2\,341.9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,与模态分析结果仅相差 0.8%。

根据式(6),(7)计算得到悬吊杆顶端铰接时系统自振周期 $T = 2.7478 \text{ s}$,抗侧刚度 $K = 2\,090 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,比 ANSYS 计算结果(模态分析结果)小 10%,即吊挂系统抗侧刚度主要由重力刚度决定,并且支座处不能保证刚接,可直接按式(6),(7)计算悬吊杆梯形布置吊挂系统的周期和抗侧刚度。

3 悬吊杆混合布置吊挂系统抗侧性能

3.1 吊挂系统抗侧刚度理论分析

悬吊杆混合布置是将图 5(a),(b)所示的 2 种

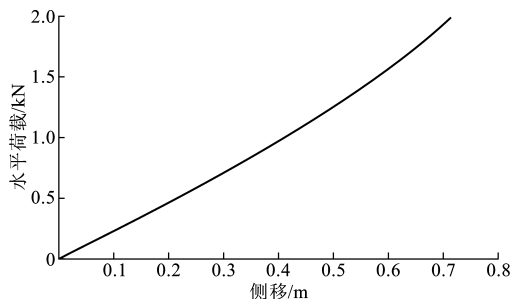


图 8 悬吊杆梯形布置吊挂系统水平荷载-侧移曲线

Fig. 8 Horizontal Load-lateral Displacement Curve of Suspension System with Trapezoidal Suspender Layout

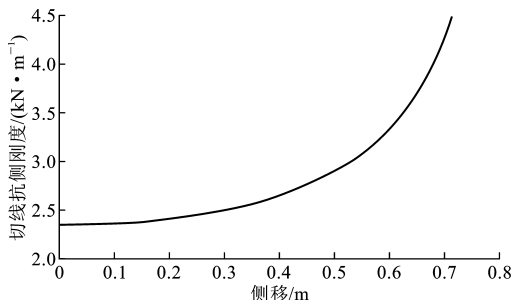


图 9 悬吊杆梯形布置吊挂系统切线抗侧刚度-侧移曲线

Fig. 9 Tangent Lateral Stiffness-lateral Displacement Curve of Suspension System with Trapezoidal Suspender Layout

梯形布置方式交错布置,如图 10 所示。

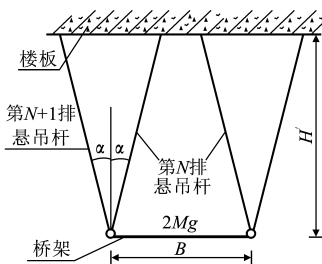


图 10 悬吊杆混合布置

Fig. 10 Composite Layout of Suspenders

在垂直于走线架方向的对称荷载作用下,2 种梯形布置的悬吊杆因变形协调而与桥架形成结构。走线架重力荷载在悬吊杆中产生预拉力,在“小震”作用下,地震作用力较小,悬吊杆中不出现压力,不会压屈失稳。取 2 排悬吊杆为分析单元,悬吊杆混合布置时吊挂系统计算简图如图 11 所示,其中, A_s 为悬吊杆截面面积。

在吊挂系统桥架一端施加水平荷载 $F = 1 \text{ N}$,计算 e 点的侧移,可得该系统的抗侧刚度。经计算,各杆轴力为: $F_{ae} = 0.25/\sin(\alpha)$, $F_{be} = -0.25/\sin(\alpha)$, $F_{cf} = 0.25/\sin(\alpha)$, $F_{df} = 0.25/\sin(\alpha)$ 。根据图乘法可得 e 点的侧移 δ 为

$$\delta = \sum \int \frac{\bar{F}_N \bar{F}_N}{EA_s} ds = \frac{0.25H}{\sin^2(\alpha) \cos(\alpha) EA_s} \quad (8)$$

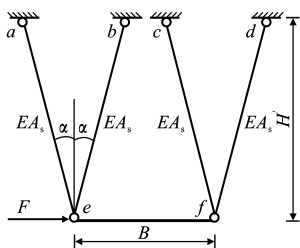


图11 悬吊杆混合布置时吊挂系统计算

Fig. 11 Calculation of Suspension System with Composite Suspenders Layout

式中: \bar{F}_N 为 $F=1\text{ N}$ 作用下悬吊杆轴力,以受拉为正,受压为负; ds 为悬吊杆方向的长度微元。

结构的初始抗侧刚度 K_{in} 为

$$K_{in} = \frac{1}{\delta} = \frac{4EA_s}{H} \sin^2(\alpha) \cos(\alpha) \quad (9)$$

实际工程中夹角 α 应小于 45° , 以避免安装麻烦, 浪费材料。在此范围内, α 值越大, 或桥架离楼板的距离越小, 单位水平力作用下系统的侧移越小, 抗侧刚度越大。对于整个走线架结构, 抗侧刚度还与悬吊杆间距有关, 吊杆间距越小, 抗侧刚度越大。

当发生较大地震时, 吊挂系统的初始地震作用较大, 悬吊杆中会产生压力, 所有悬吊杆在地震反复作用下受压失稳, 不能继续承担压力, 只能承担拉力, 变为图12所示的双线摆系统, 其周期和抗侧刚度分别按式(1), (2)计算。假设悬吊杆完全不能承担压力, 根据水平荷载在悬吊杆中产生的压力与走线架重力荷载在悬吊杆产生的压力相等, 可计算出吊挂系统抗侧刚度发生突变的临界水平荷载 F_{cr}

$$F_{cr} = 2Mg \tan(\alpha) \quad (10)$$

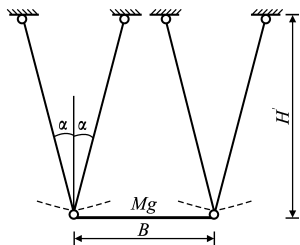


图12 双线摆系统

Fig. 12 Bifilar Pendulum System

当水平荷载或地震作用产生的 $F < F_{cr}$ 时, 悬吊杆混合布置吊挂系统抗侧刚度根据式(9)计算; 当 $F \geq F_{cr}$ 时, 吊挂系统侧向刚度根据式(2)计算。

3.2 吊挂系统抗侧刚度数值分析

悬吊杆混合布置吊挂系统中取 $\alpha = 10^\circ$, 其余数据与第1.2节中相同, 此时倒梯形布置的悬吊杆悬吊点间距为 1.3 m , 建立吊挂系统 ANSYS 有限元

模型。悬吊杆根据实际情况建模, 采用 Link180 单元进行模拟。桥架建模时也采用 Link180 单元模拟, 但截面尺寸取值远大于悬吊杆。在桥架上施加水平荷载 1 N , 计算得到结构侧移为 $1.05 \times 10^{-6}\text{ m}$, 对应的抗侧刚度为 $9.5 \times 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

将数据代入式(9), 得到抗侧刚度为 $9.6 \times 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 与 ANSYS 分析结果相差 1.04% , 同时根据式(10)可计算出临界水平荷载 $F_{cr} = 1\,382.4\text{ N}$ 。

4 吊挂系统抗侧性能比较分析

当悬吊杆顶端铰接时, 悬吊杆垂直布置吊挂系统的自振周期 T_v 根据式(1)计算, 悬吊杆梯形布置吊挂系统的自振周期 T_t 根据式(6)计算。由图7还可知: 当 $0 \leq \beta \leq 1$ 时[图5(a)], $T_t = 0.998 T_v \sim T_v$, 可认为 $T_t \approx T_v$, 此时2种布置方式下吊挂系统的抗侧性能相近; 当 $\beta > 1$ 时[图5(b)], $T_t/T_v < 1$, 且随着悬吊点间距 A 的增大, 该比值不断减小。因此, 悬吊杆垂直布置吊挂系统的抗侧刚度 K_v 要小于悬吊杆梯形布置吊挂系统的抗侧刚度 K_t , 且随着悬吊点间距 A 的增大, K_t/K_v 值增大。本文第1.2节和第2.2节中的计算结果证明了该结论 ($K_v = 1\,960\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $K_t = 2\,090\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $K_v < K_t$)。当悬吊杆顶端刚接时, 悬吊杆垂直布置吊挂系统抗侧刚度要小于梯形布置, 均大于顶端铰接情况。在较小变形范围内, 支座约束状态对抗侧刚度的影响较小, 吊挂系统的抗侧刚度主要由重力刚度决定。这2种布置方式下吊挂系统抗侧刚度小, 自振周期大, 能有效地避开卓越周期, 地震作用小, 抗震性能良好, 但是会产生较大的侧移, 危及线缆工作。

悬吊杆混合布置时, 在小于临界水平荷载 F_{cr} 的水平荷载作用下, 吊挂系统抗侧刚度很大, 有较好抵抗侧移的能力, 能保证线缆正常工作。在第3.2节中的计算条件下, 其初始抗侧刚度 $K_{in} = 9.6 \times 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 分配到每一排悬吊杆的初始抗侧刚度 $K_{in,1} = 4.8 \times 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 是悬吊杆垂直布置时(第1.2节, $K_v = 1\,960\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)的245倍, 是梯形布置时(第2.2节, $K_t = 2\,090\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)的230倍。当吊挂系统上的荷载 $F \geq F_{cr}$ 时, 抗侧刚度急剧减小(由 $4.8 \times 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 减小至 $1\,960\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$), 自振周期增大, 地震作用减小, 不会使走线架结构因锚栓或杆件的破坏而发生结构倒塌, 达到“小震不坏, 大震不倒”的抗震设防要求。这里的“小震”是指在吊挂系统上产生的地震作用小于临界水平荷载 F_{cr} 的地震。

5 结 语

(1)当悬吊杆支座约束状态及走线参数相同时,悬吊杆垂直布置吊挂系统的抗侧刚度要小于倒梯形布置情况,而与正梯形布置情况相近。对于悬吊杆垂直布置和梯形布置吊挂系统,支座按刚接处理的抗侧刚度要大于按铰接处理。当支座刚接时,悬吊杆垂直布置和梯形布置吊挂系统的切线抗侧刚度随着侧移的增大而增大,且增长幅度越来越大,但在较小变形范围内,切线抗侧刚度变化较小,吊挂系统的抗侧刚度主要由重力刚度决定,与走线架等效质量和走线架距楼板的距离有关,而支座约束状态对抗侧刚度的影响较小。这 2 种布置方式下吊挂系统的抗侧刚度均很小,虽然地震作用小,抗震性能好,但侧移较大,危及线缆工作。

(2)悬吊杆混合布置吊挂系统在“小震”作用下的初始抗侧刚度与垂直布置和梯形布置相比有了很大程度的提高。在“大震”作用下,抗侧刚度急剧减小,自振周期变大,有效地避开卓越周期,地震作用减小,抗震性能较好。采用这种布置方式的走线架吊挂系统既能保证“小震”下走线架良好的抗侧性能和线缆的安全工作,又能保证“大震”下良好的抗震性能,不引起结构的倒塌,达到“小震不坏,大震不倒”的抗震设防要求,是一种合理、高效的布置方式,可应用于实际工程。

参考文献:

References:

- [1] PEARCE B K, JACKSON J E, DIXON M W, et al. Reduction of Seismic Loads in Cable Tray Hangers [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 81 (3): 403-410.
- [2] SHAHIN R M, MANUELYAN R, JAN C M. Seismic Analysis and Design of Electrical Cable Trays and Support Systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 1978, 45 (2): 515-522.
- [3] 梁启智, 张耀华. 巨型框架悬挂体系动力系统及减震性能分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 1998, 26 (10): 1-6.
LIANG Qi-zhi, ZHANG Yao-hua. Analysis of the Dynamic System and Aseismic Properties of Megaframe with Suspension System [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 1998, 26 (10): 1-6.
- [4] 马 珺, 唐柏鉴. 巨型钢框架-拉索吊挂结构拉索参数确定方法[J]. 力学与实践, 2012, 34 (6): 23-26.
MA Jun, TANG Bai-jian. Estimation of Cable's Pa-

rameters in Mega Steel Frame and Cable Hanging Structure [J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34 (6): 23-26.

- [5] 涂永明, 张继文, 吕志涛, 等. 悬挂建筑减振体系次结构的抗侧性能[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38 (6): 1099-1104.
TU Yong-ming, ZHANG Ji-wen, LU Zhi-tao, et al. Lateral Performance of Substructure of Suspended Vibration Absorption System [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38 (6): 1099-1104.
- [6] 王玉朋, 魏 璁. 悬吊质量结构的抗震计算及减震性能分析[J]. 建筑结构, 1990 (5): 2-8.
WANG Yu-peng, WEI Lian. Seismic Computation and Damping Performance Analysis of Suspension-mass Structure [J]. Building Structure, 1990 (5): 2-8.
- [7] 涂文戈, 邹银生. 悬挂结构动力特性的时频分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23 (1): 78-84.
TU Wen-ge, ZOU Yin-sheng. Time and Frequency Domain Analysis of Suspension Structure Dynamic Characteristics [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23 (1): 78-84.
- [8] 周金荣, 汲书强, 黄维学. 通信抗震防灾构筑生命线工程[J]. 世界电信, 2008 (6): 21-24.
ZHOU Jin-rong, JI Shu-qiang, HUANG Wei-xue. Seismic Disaster Prevention in Lifeline Engineering of Communication [J]. World Telecommunications, 2008 (6): 21-24.
- [9] 张立颖. 加强通信网络抗震建设, 构筑生命线工程[J]. 科技传播, 2010 (15): 9, 14.
ZHANG Li-ying. Strengthening Seismic Construction of Communication Network to Build Lifeline Engineering [J]. Public Communication of Science & Technology, 2010 (15): 9, 14.
- [10] 屈文俊, 陆震寰, 刘扬明. 通信机房走线架结构隔震方法的可行性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31 (1): 36-43.
QU Wen-jun, LU Ting-huan, LIU Yang-ming. Feasibility Analysis of Seismic Isolation Method on Cable Tray Structure in Communication Room [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31 (1): 36-43.
- [11] 姚云龙, 章跃军, 张佚伦, 等. 工业建筑综合吊挂体系抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36 (4): 56-60, 49.
YAO Yun-long, ZHANG Yue-jun, ZHANG Yi-lun, et al. Seismic Performance of Composite Suspension Structure in Industrial Construction [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36 (4): 56-60, 49.