

文章编号:1673-2049(2014)02-0032-05

通信设备走线架吊挂系统抗侧性能研究

屈文俊, 卢瀚, 刘扬明

(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,开展了既有通信设备走线架吊挂系统抗侧性能研究。采用理论方法推导了走线架结构吊挂系统的抗侧刚度并建立有限元模型加以验证,提出增加柔性交叉支撑杆以增强吊挂系统抗侧刚度的加固方法。研究结果表明:既有通信设备走线架悬吊结构水平传力路径不明确,抗侧刚度小,其综合抗侧刚度主要由重力恢复刚度决定,吊杆自身的剪切刚度对综合抗侧刚度的影响可以忽略不计,设置吊杆间支撑杆的加固方法可以有效提高既有通信设备走线架的抗侧刚度。

关键词:加固;抗侧性能;理论推导;走线架;吊挂系统

中图分类号:TU323 **文献标志码:**A

Research on Lateral Performance of Communication Cable Tray Suspension System

QU Wen-jun, LU Han, LIU Yang-ming

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

Abstract: According to the requirements for seismic resistance of lifeline engineering, research on the lateral performance of communication cable tray suspension systems were conducted. The lateral stiffness of communication cable tray suspension systems were deduced by theoretical method and the formulae were verified by finite element method. Flexible X-brace were adopted to strengthen the lateral stiffness of suspension systems. The study results show that the lateral load paths of cable tray suspension systems are not clear and the lateral stiffness of communication cable tray suspension systems is very small. The integrated lateral stiffness is mainly determined by the gravity recovery stiffness while the influence of shear stiffness can be neglected. Excellent lateral stiffness of communication cable tray can be obtained by adding X-brace in span of derricks.

Key words: reinforce; lateral performance; theoretical derivation; cable tray; suspension system

0 引言

通信设备走线架是机房内支承各种光纤、电缆的主要结构体系。走线架吊挂系统作为一种悬挂的建筑物,符合自然传力原理,能够充分利用构件(受拉锚杆)材料的力学性能,具有优良的建筑功能

适应性,但是目前这类结构基本上属于串联体系,失效概率大,抗侧刚度较小,在水平力作用下水平位移难以得到有效控制,且水平力传力路径少,抗震防线少^[1-3]。本文中笔者对走线架吊挂系统抗侧性能进行了研究,通过建立吊挂系统运动微分方程推导其抗侧刚度,并建立相应的有限元简化模型加以验证,

收稿日期:2014-01-11

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,河南辉县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:quwenjun. tj@tongji. edu. cn。

最后提出增强走线架结构整体抗侧刚度的方法。

1 既有走线架吊挂系统抗侧性能

走线架吊挂系统通过柔性吊杆将走线架承受的线缆荷载传递到主体结构的楼板上。柔性吊杆的剪切刚度很小,走线架吊挂系统的抗侧刚度主要由于其自重产生的重力恢复刚度来提供。既有走线架吊挂系统具有以下特点:①刚度小,自振周期大,能有效避开地震场地卓越周期,地震作用效应较小;②相对较小的抗侧刚度使得吊挂系统在水平力作用下有相对较大的侧移。悬吊结构体系在以往的震害中表现出了良好的抗震性能,是一种较好的抗震结构^[4-6]。在进行走线架结构设计时,应当满足刚柔并济的设计原则,既要充分利用走线架吊挂系统作为摆结构地震作用效应较小的优点,也要注意控制其侧移在合理的范围内。

1.1 悬吊结构抗侧刚度理论分析

走线架吊挂系统由柔性吊杆承担桥架上线缆的荷载,吊杆顶部通过膨胀螺栓锚固于上部结构楼板,3层桥架通过较短的支撑杆联结成整体^[7-13],其联结竖杆的切向刚度远大于吊杆,可将走线架整体作为单自由度质量块。单摆结构示意如图 1 所示,其中, m 为物体的质量, L 为单摆的长度, g 为重力加速度。悬吊结构计算简图如图 2 所示,其中, δ 为走线架在水平力作用下产生的侧移; $\varphi(x)$ 为形状函数, $\eta(t)$ 为广义坐标, t 为时间, W 为重力, $W=m_2g$, m_2 为吊杆间距范围内走线架等效质量(包括其上部的光纤、电缆质量), Q 为广义力。

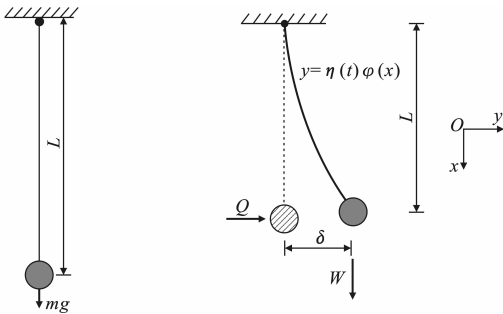


图 1 单摆结构示意图

Fig. 1 Schematic of Simple Pendulum Structure

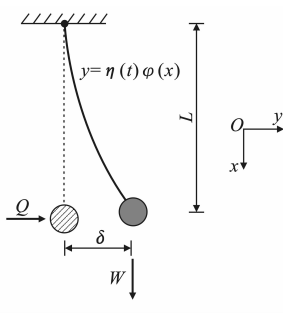


图 2 悬吊结构计算简图

Fig. 2 Schematic of Suspension Structure Calculation

当吊杆顶部铰接时,走线架结构计算可以简化为图 1 中的单摆结构,其固有周期 T 由下式确定

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

单摆结构的摆长是确定固有周期的惟一参数,物体的质量 m 对其没有影响,结构的抗侧刚度 K_L 仅由质量块重力荷载的分力提供,其大小为

$$K_L=\frac{mg}{L} \quad (2)$$

当悬吊结构的质量块离开其平衡位置时,结构的抗侧刚度主要由质量块重力荷载的水平分力产生的重力恢复刚度以及吊杆作为悬臂杆弹性弯曲刚度提供。

假定悬臂吊杆的挠曲线方程为 $y(x, t) = \eta(t)\varphi(x)$,其形状函数 $\varphi(x)$ 假定为

$$\varphi(x)=\frac{x^2}{2l^3}(3l-x) \quad (3)$$

式中: x, y 分别为图 2 中 x 方向和 y 方向坐标; l 为吊杆长度。

该形状函数 $\varphi(x)$ 满足下列边界条件

$$\left. \begin{aligned} \varphi(0) &= \frac{x^2}{2l^3}(3l-x) \Big|_{x=0} = 0 \\ \varphi'(0) &= \left(\frac{-3x^2}{2l^3} + \frac{3x}{l^2} \right) \Big|_{x=0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi''(l) &= \left(\frac{-3x}{l^3} + \frac{3}{l^2} \right) \Big|_{x=l} = 0 \\ \varphi(l) &= \frac{x^2}{2l^3}(3l-x) \Big|_{x=l} = \frac{l^2}{2l^3}(3l-l) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(4)表示 $x=0$ 时吊杆端位移和转角均为 0;式(5)表示 $x=l$ 时自由端的弯矩为 0,自由端的位移为 1。

由拉格朗日方程求解运动微分方程得

$$T'=\frac{1}{2}m_2\dot{y}^2=\frac{1}{2}m_2\dot{\eta}^2(t)\varphi^2(l) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \int_0^l EI (y''(x, t))^2 dx + \frac{1}{2} m_2 g \cdot \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l EI \eta^2(t) (\varphi''(x))^2 dx + \\ &+ \frac{1}{2} m_2 g \int_0^l \eta^2(t) (\varphi'(x))^2 dx \end{aligned} \quad (7)$$

式中: T' 为吊杆的动能; V 为吊杆的势能; EI 为吊杆的抗弯刚度。

拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T'}{\partial \dot{\eta}(t)} \right) + \frac{\partial V}{\partial \eta(t)} = Q \quad (8)$$

将式(6),(7)代入式(8),得到该悬臂吊杆的运动微分方程为

$$\begin{aligned} \varphi^2(l) m_2 \ddot{\eta}(t) + \left[\int_0^l EI (\varphi''(x))^2 dx + \right. \\ \left. m_2 g \int_0^l (\varphi'(x))^2 dx \right] \eta(t) = Q \end{aligned} \quad (9)$$

式中： $\int_0^l EI(\varphi''(x))^2 dx + m_2 g \int_0^l (\varphi'(x))^2 dx$ 为悬臂吊杆结构的综合广义刚度， $\int_0^l EI(\varphi''(x))^2 dx$ 为广义刚度， $m_2 g \int_0^l (\varphi'(x))^2 dx$ 为广义几何刚度。

设综合广义刚度 K 为

$$K = \int_0^l EI(\varphi''(x))^2 dx + m_2 g \int_0^l (\varphi'(x))^2 dx \quad (10)$$

将式(3)代入式(10)得

$$K = \int_0^l EI\left(\frac{3}{l^2} - \frac{3x}{l^3}\right)^2 dx + m_2 g \int_0^l \left(\frac{3x}{l^2} - \frac{3x^2}{2l^3}\right)^2 dx = \frac{9EI}{l^6} \int_0^l (l-x)^2 dx + \frac{9m_2 g}{4l^6} \int_0^l (2xl-x^2)^2 dx = \frac{3EI}{l^3} + \frac{6m_2 g}{5l} \quad (11)$$

式中：第 1 项为悬臂吊杆弯曲提供的抗侧刚度；第 2 项为重力荷载分量产生的切向刚度。

不计吊杆的自重，由式(10)可得广义质量 $M = \varphi^2(l)m_2 = m_2$ 。体系的近似无阻尼角频率 ω 为

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\left(\frac{3EI}{l^3} + \frac{6m_2 g}{5l}\right) / m_2} = \sqrt{\frac{15EI + 6m_2 gl^2}{5m_2 l^3}} \quad (12)$$

上述综合广义刚度和结构自振角频率的理论推导受形状函数精度的影响较大，式(11)、(12)仅为近似值。在工程设计时，还可近似将嵌固吊杆-质量模型看作是悬臂吊杆和质量块单摆模型的叠加，即综合广义刚度还可近似简化为 $K = 3EI/l^3 + m_2 g/l$ 。通过做此简化，仍能将误差控制在允许范围内。

1.2 悬吊结构抗侧性能数值分析

对于吊杆顶端嵌固的情形，试算一简单算例。假定吊杆直径 $d = 0.01\text{ m}$ ，吊杆长度 $l = 2.0\text{ m}$ ，吊杆间距 $a = 2.0\text{ m}$ ，走线架上的线缆线荷载 $q = 2.0\text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ，吊杆间距范围内的走线架等效质量 $m_2 = qa/g = 400\text{ kg}$ 。

由第 1.1 节中的推导可知，该走线架吊挂系统综合广义刚度 K 为

$$K = \frac{3EI}{l^3} + \frac{6mg}{5l} = 2\,427.84\text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (13)$$

体系近似无阻尼角频率 ω 为

$$\omega = \sqrt{\frac{15EI + 6mgl^2}{5ml^3}} = 2.444\text{ rad} \quad (14)$$

运用 ANSYS 建立有限元模型，建立吊杆和走线架质量块简化模型，吊杆和质量块分别采用 Beam188 单元和 Mass21 单元模拟，吊杆顶端嵌固，

为了考虑质量块自重 在吊杆中产生的拉力对吊杆应力刚度(切向刚度)的强化，进而影响结构的固有频率和模态，在进行结构模态分析前，打开预应力效应开关，先施加重力加速度进行静力求解，然后再获取结构的模态分析结果。

吊杆-质量块模型的第 1 阶模态自振频率为 $f = 0.367\,333\text{ s}^{-1}$ ，理论计算结果与 ANSYS 分析结果的对比见表 1。

表 1 理论推导值、近似解与 ANSYS 计算值的对比
Tab. 1 Comparison of Theoretical Derivation Values, Approximate Solutions and ANSYS Calculated Values

抗侧性能参数	吊杆剪切刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	重力恢复刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	综合广义刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	第 1 阶自振角频率/rad
理论推导值	75.84	2352.00	2427.84	2.444
近似解	75.84	2000.00	2075.84	2.257
ANSYS 计算值	75.82	2092.84	2168.66	2.308
相对误差/%	0.03	-4.43	-4.35	-2.21

对比理论推导计算结果近似解和 ANSYS 模态分析结果可知，近似解法与 ANSYS 计算的结构综合广义刚度、第 1 阶自振角频率等相差较小，说明理论推导的近似计算公式具有较高的精度。由表 1 可以看出，悬吊结构的综合广义刚度主要由其重力恢复刚度决定，吊杆自身的剪切刚度影响可以忽略不计。此时悬吊结构近似摆结构，在水平力作用下将发生过大的侧移，需要增大其抗侧刚度并进行抗侧性加固。

2 吊挂系统抗侧性加固

为了提高既有走线架吊挂系统的抗侧刚度，本文中提出在 2 根竖向吊杆之间，设置一组交叉的柔性支撑杆，如图 3 所示。

由于吊杆截面积很小，与走线架型材相比，截面模量很小，可以忽略其自身的抗弯刚度，吊杆及后加的柔性支撑杆均可视为二力杆，仅承受轴向力的作用，吊杆及支撑杆杆端各连接点视为铰接。加固前的吊挂系统受

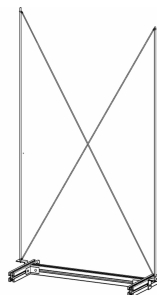


图 3 加固后吊挂系统示意
Fig. 3 Schematic of Suspension System After Reinforced

各类线缆的自重作用，根据中国移动集团设计院有限公司上海分公司提供的有关数据，通信设备走线

架横担上线荷载设计值为 $2.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 一般情况下, 竖向吊杆始终承受拉力作用而不会受压失稳失效。但是为避免强烈地震作用下导致的竖向吊杆受压屈曲失稳, 可在两侧竖向吊杆上各套 1 根不直接受力的套筒, 套筒直径略大于吊杆而长度小于吊杆。对于用于加固的交叉支撑杆只考虑其拉杆作用, 受压后即退出工作。加固后的走线架吊挂系统计算简化模型如图 4 所示, 其中, $E_1 A_1$ 为受拉吊杆及支撑杆的刚度, $E_2 A_2$ 为横杆的刚度。

在吊杆底端走线架横担上施加单位力, 根据结构发生的侧移即可推导其抗侧刚度。与第 1.2

节中相似, 试算 1 个算例。如图 4 所示, 吊杆长度 $l=2.0 \text{ m}$, 吊杆及后加交叉支撑杆直径 $d=0.01 \text{ m}$, 截面积 $A_1=78.5 \text{ mm}^2$, 弹性模量 $E_1=206 \text{ GPa}$; 横担长度 $b=0.6 \text{ m}$, 截面积 $A_2=378 \text{ mm}^2$, 弹性模量 $E_2=68 \text{ GPa}$ 。在底部横担上沿 CD 方向施加单位力 1 N , BC 杆受压退出工作, 只考虑 AC, AD, BD, CD 杆作用, 求得图 4 中各吊杆轴力为: $F_{AC}=0$, $F_{BD}=3.333 \text{ N}$, $F_{AD}=-3.48 \text{ N}$, $F_{CD}=-1 \text{ N}$ 。由图乘法求得吊杆底端侧移 δ 为

$$\delta = \sum \int \frac{\bar{F}_N F_{NP}}{EA_0} ds = 2.961 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (15)$$

式中: EA_0 为受拉刚度; A_0 为吊杆截面积; \bar{F}_N 为沿吊杆方向的单位力; F_{NP} 为吊杆受到的轴力(以受拉为正, 受压为负); ds 为吊杆方向的长度微元。

相应地, 结构抗侧刚度 $K_L = 1/\delta = 3.377 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。根据上述计算参数, 建立加固后吊挂系统有限元简化模型, 如图 5 所示。在吊杆底部横担上施加单位力, 进行静力求解, 计算得结构侧移为 $2.960 \times 10^{-6} \text{ m}$, 对应加固后吊挂系统抗侧刚度为 $3.379 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。加固后吊杆单位水平力作用下的变形见图 6。

对比加固后吊挂系统的抗侧刚度计算结果, 理论推导值($3.377 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)略小于 ANSYS 计算值($3.379 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$), 相对误差仅为 0.06% 。由于理论计算过程中对结构进行了一定的简化, 忽

略了吊杆自身的抗剪能力, 因此理论推导值略微偏小, 但是二者偏差在工程允许范围内, 说明上述简化具有合理性, 理论推导加交叉支撑杆的抗侧刚度计算方法具有很高的精度。

加固前吊挂系统抗侧刚度仅由重力刚度和吊杆剪切刚度提供, 刚度较小, 为 $2.308 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; 在 2 根吊杆间设置交叉的柔性支撑后, 交叉支撑杆的轴向刚度较大, 吊杆内轴向力的水平分力能够为吊挂系统贡献极大的抗侧刚度, 通过设置交叉支撑杆, 结构抗侧刚度提升至 $3.379 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 放大 146 倍多, 由此可见, 吊杆间支撑杆的设置可以有效提高既有通信设备走线架吊挂系统的抗侧刚度。

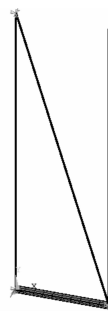


图 5 加固后吊挂系统有限元模型
Fig. 5 Finite Element Model of Suspension System After Reinforced

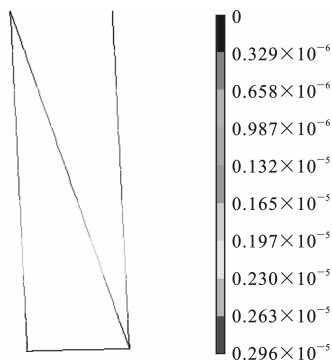


图 6 加固后吊杆单位水平力作用下的变形
Fig. 6 Deformation of Suspender Under Unit Horizontal Force After Reinforced

3 结 语

(1) 运用理论分析和数值模拟的方法对走线架吊挂系统的抗侧性能进行了研究。推导了悬吊结构的抗侧刚度简化计算公式, 并用有限元简化模型加以验证。结果表明, 悬吊结构综合抗侧刚度主要由重力恢复刚度决定, 吊杆自身的剪切刚度影响可以忽略不计。对比理论推导计算结果近似解和 ANSYS 模态分析结果可知, 理论推导的近似解具有较高的精度。

(2) 针对机房走线架整体抗侧刚度不足的现状, 可以通过在既有吊挂系统各组吊杆间设置交叉支

撑,以增大吊挂系统的抗侧刚度。在 2 根吊杆间设置交叉的柔性支撑后,交叉支撑杆的轴向刚度较大,吊杆内轴向力的水平分力能够为吊挂系统贡献极大的抗侧刚度,吊杆间支撑杆的设置可以有效地提高结构的初始抗侧刚度,控制地震作用下走线架结构吊挂系统的水平位移,保证生命线工程-通信设备的安全运营。

参考文献:

References:

- [1] 周金荣,汲书强,黄维学. 通信抗震防灾构筑生命工程线[J]. 世界电信,2008(6):21-24.
ZHOU Jin-rong, JI Shu-qiang, HUANG Wei-xue. Seismic Disaster Prevention in Life Line Engineering of Communication [J]. World Telecommunications, 2008(6):21-24.
- [2] 张立颖. 加强通信网络抗震建设,构筑生命工程[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.
- [3] 屈文俊,陆霆寰,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.
- [4] 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.
- [5] 王玉朋,魏 璉. 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.
- [6] 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.
- [7] CSA C22. 2 No. 126. 1-09, Metal Cable Tray Systems [S].
- [8] 倪锡颖. 通信机房的设计[J]. 硅谷,2012(15):57-58.
NI Xi-ying. The Design of Communication Computer Room[J]. Silicon Valley, 2012(15):57-58.
- [9] YD/T 5026—2005, 电信机房铁架安装设计标准[S].
YD/T 5026—2005, Installation and Design Standard for Cabling Duct in the Room of Telecommunication [S].
- [10] YD 5059—2005, 电信设备安装抗震设计规范[S].
YD 5059—2005, Design Specification for Seismic Installation of Telecommunication Equipment[S].
- [11] 朱慈勉. 结构力学:下册[M]. 上海:高等教育出版社,2006.
ZHU Ci-mian. Structural Mechanics: Volume II [M]. Shanghai: Higher Education Press, 2006.
- [12] 王勖成,邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,1997.
WANG Xu-cheng, SHAO Min. The Basic Principle and Numerical Method of the Finite Element Method [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [13] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2010.
WANG Xin-min. ANSYS Numerical Analysis of Engineering Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.