

从一起扶梯事故谈梯级曳引链的监督检验

王丽枝

湖南省特种设备检验检测研究院娄底分院 湖南 娄底 417000

【摘要】：通过对某型自动扶梯因梯级曳引链选用不当而出现的曳引链链片断裂，并导致乘客受伤的严重事故的分析，在满足 GB16899-2011 要求的基础上，对断裂链片所载荷进行了分析、计算，找出了事故产生的原因，为避免此类事故的再次发生，由此提出了对梯级曳引链型式试验及监督检验进行改进的一些具体建议。

【关键词】：扶梯；梯级曳引链；断裂；监督检验；改进

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.070

1 引言

自动扶梯是一种带有循环运行梯级，用于向上或向下倾斜运输乘客的固定电力驱动装备。其中自动扶梯中的梯级是乘客站立的位置，自动扶梯的主要工作原理是由曳引机上的小链轮通过双排链的链传动带动大驱动链轮，再由大驱动链轮带动封闭的梯级曳引链实现循环运行的。一台自动扶梯的梯级曳引链由两根特殊制造的梯级曳引链(实际上就是一种特殊型式的滚子链)组成，梯级通过梯级曳引链串联起来，如图 1 所示，梯级曳引链上的滚轮的外圈用聚胺脂制成，内圈采用滚动轴承结构，当曳引机带动梯级曳引链运行时，梯级曳引链上的滚轮便沿着特定的导轨实现运行。

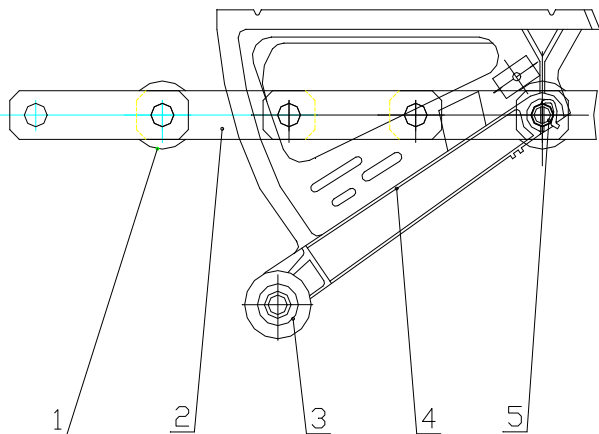


图 1 梯级曳引链与梯级的连接

1-主轮 2-梯级曳引链 3-副轮 4-梯级 5-梯级轴

由此可知，梯级曳引链运行时主要承受的是梯级上所站立乘客的重量。自动扶梯也因其具有能连续地运送乘客，且运送能力大，运送客流量均匀等优势而获得广泛的应用，目前已成为客流量大的公共场所中的空间两层间面的理想客运工具。自动扶梯也因其服务于公共场所的特性，使之与自动人行道、电梯一样成为国家监督管理的特种设备。

2 梯级曳引链断裂事故的基本情况

客观的讲，尽管自动扶梯及自动人行道与电梯一样同属特种设备，且其所出现的安全事故频次也确实比电梯少很多。但其一些案例中所产生的安全事故的严重危害程度却一点也不亚于电梯。例如：据笔者所知，2015 年在深圳某私营商城安装的某民营企业生产并安装的一台用于人员下行的提升高度达 12.3 米的室外型自动扶梯，先行在用户处进行了整梯型式试验取证，尔后交付用户使用，但该梯在通过整梯型式试验后约运行 3 年后，于 2018 年春季的某天上午出现梯级曳引链链片断裂，造成梯级下滑，乘客受伤的扶梯安全事故，所幸扶梯梯级曳引链安全装置及时触发了扶梯停机保护，且当时乘梯人员很少，未造成恶劣的社会影响。事后事故调查组经调查论证后，最终给出的结论是：生产厂家为追求利润，降低生产成本，修改了该类扶梯的标准配置，临时选用了不当的梯级曳引链(理论上应使用重型梯级曳引链，实际却使用了轻型梯级曳引链)，加之因扶梯为室外型梯，梯级曳引链链片因表面防腐不好而产生了部分腐蚀破损，最终导致了梯级曳引链链片断裂的安全事故。

诚然，扶梯制造厂家为追求高额利润，不惜更改自动扶梯已定型产品的配置，对此次事故应负全责，这是毋庸置疑的，但站在特种设备监督检验人员的角度进行思考，却不禁想要认真分析一下：制造厂家更改已定型产品的配置是如何轻易通过梯级曳引链型式试验的？又是如何轻易通过监督检验的？此事故尽管已过去多年，且事故产生原因也有了明确结论，如今再次提出，就是想从梯级曳引链强度校核、梯级曳引链型式试验及自动扶梯监督检验等方面进行深层次的挖掘，以便找出其背后的一些深层次的影响因素并加以修正，从而避免或杜绝此类事故后续的再次发生。

3 梯级曳引链的强度校核

为探讨制造厂家所用的重型梯级曳引链与轻型梯级曳引链的曳引能力，以下分别对其强度进行校核。

根据自动扶梯的结构我们知道：梯级的运行是依靠链传动部分带动左、右梯级曳引链来完成的，为简化计算，现假定每根梯级曳引链平均承载，且忽略滚动摩擦阻力，则梯级曳引链主要承受拉力。

3.1 梯级曳引链的受力计算

根据知道扶梯的结构及工作原理可知，梯级曳引链所受的拉力由以下三方面组成： F_1 -乘客载荷； F_2 -梯级和梯级曳引链载荷； F_3 -曳引链的初张力。

(1) F_1 -乘客载荷，满载时，所有乘客的重力在梯级曳引链受拉力方向上的分力， $F_1 = m_1 g \sin \alpha$

其中： α -扶梯倾角， $\alpha = 30^\circ$

g -重力加速度， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

m_1 -乘客总载荷， $m_1 = n_{\text{梯}} \cdot n \cdot m_{\lambda} \cdot k_m \cdot H / \sin \alpha$

$n_{\text{梯}}$ -倾斜长度上每米的梯级数， $n_{\text{梯}} = 1000 \cdot \sin 30^\circ / 200 = 2.5$

n -每个梯级可站的人数， $n = 2$

m_{λ} -每为乘客的重量，取 $m_{\lambda} = 60 \text{ kg}$

k_m -满载系数，取 $k_m = 0.9$

H -提升高度，m

则： $F_1 = 2.5 \times 2 \times 60 \times 0.9 \times \frac{H}{\sin \alpha} \times 9.8 \sin \alpha = 2646H \text{ (N)}$

(2) F_2 -梯级和梯级曳引链载荷，倾斜长度上的梯级和曳引链的重力在曳引链受拉力方向上的分力。 $F_2 = m_2 g \sin \alpha$ 。

其中： m_2 -梯级和梯级曳引链总载荷，kg， $m_2 = n_{\text{梯}} \cdot m_{\text{梯}} \cdot H / \sin \alpha$

$m_{\text{梯}}$ -一个梯级及所含梯级曳引链总重量，kg， $m_{\text{梯}} = 13.5 + 9 = 22.5 \text{ kg}$

则： $F_2 = 2.5 \times 22.5 \times \frac{H}{\sin \alpha} \times 9.8 \sin \alpha = 551.25H \text{ (N)}$

(3) F_3 -梯级曳引链的初张力，单根曳引链所受的张力 $F_3 = \frac{1}{2} K X g$ ，采用的压簧 10×45×140 GB/T2089-1994^[1]

其中： K -弹簧刚度，kg/mm，查相关技术资料^[2]可知： $K = 4.28 \text{ kg/mm}$

X -变形量，mm，由产品图知： $X = 160 - 120 = 40 \text{ mm}$

则： $F_3 = \frac{1}{2} \times 4.28 \times 40 \times 9.8 = 838.88H \text{ (N)}$

(4) $F_{\text{总}}$ -曳引链所受的总载荷

$$F_{\text{总}} = F_1 + F_2 + 2F_3 = 2646H + 551.25H + 2 \times 838.88 = 3197.25H + 1677.76 \text{ (N)}$$

$$(5) F\text{-单片链片所受的拉力} F = \frac{1}{4} F_{\text{总}} = \frac{1}{4} \times (3197.25H + 1677.76) = 799.31H + 419.44 \text{ (N)}$$

3.2 重型梯级曳引链的强度校核

重型梯级曳引链链片的结构如图2所示，由图可知，其危险截面面积为： $S = 5 \times (40 - 20) = 100 \text{ mm}^2$

则链片的拉应力：

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{799.31H + 419.44}{100} = 7.99H + 4.1944 \text{ MPa}$$

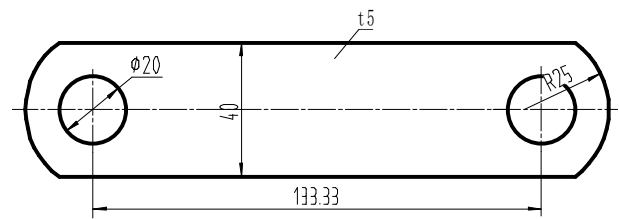


图2 重型梯级曳引链链片的结构

链片材料为40Cr，并调质 36~40HRC，查相关技术资料^[3]可知： $\sigma_s = 785 \text{ MPa}$

$$\text{则安全系数为 } n = \frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{785}{7.99H + 4.1944}$$

由此可求出不同提升高度重型梯级曳引链链片的安全系数，见下表1：

表1 重型梯级曳引链不同提升高度链片的安全系数

提升高度(m)	3	4	5	6	12.3	19.08
安全系数 n	27.87	21.71	17.79	15.06	7.85	5

根据 GB16899-2011《自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》中 5.4.1.3.2 的要求：^[4]

“5.4.1.3.2 所有驱动元件静力计算的安全系数不应小于5。如果采用三角传动皮带，不应少于3根。”

故可知：自动扶梯国家标准规定 $n \geq 5$ ，由上述计算可知，重型梯级曳引链可满足提升高度 $H \leq 19.08 \text{ m}$ 提升高度自动扶梯的要求。

3.3 轻型梯级曳引链的强度校核

轻型梯级曳引链链片的结构与重型相同，只不过其厚度由原来的5mm改为4mm，链片宽度由原来的40mm改为35mm，材质未变。由此可知，其危险截面面积为： $S = 4 \times (35 - 20) = 60 \text{ mm}^2$

则链片的拉应力： $\sigma = \frac{F}{S} = \frac{799.31H+419.44}{60} = 13.32H + 6.9907\text{MPa}$

链片材料为 40Cr，并调质 36~40HRC，查相关技术资料可知： $\sigma_s = 785\text{MPa}$

则安全系数为 $n = \frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{785}{13.32H+6.9907}$

由此可求出不同提升高度轻型梯级曳引链链片的安全系数，见下表 2：

表 2 轻型梯级曳引链不同提升高度链片的安全系数

提升高度(m)	3	4	5	6	11.26	12.3
安全系数 n	16.72	13.02	10.66	9.03	5	4.59

根据 GB16899-2011《自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》要求可知，轻型梯级曳引链不满足提升高度 H=12.3m 提升高度自动扶梯的要求。

4 梯级曳引链断裂原因分析

根据上述计算及国标 GB16899-2011 的相关要求，可以确定该制造厂家选用的轻型梯级曳引链其安全系数为 $4.59 < 5$ ，明显偏低，是不符合要求的。由于该梯提升高度为 12.3 米，属于 6 米以上梯，按国标 GB16899-2011 要求需配置附加制动器，因此，该梯进行整梯型式试验以取得该提升高度的制造许可时，除需进行 6 米以下梯的空载及有载制停距离等对扶梯有一定损伤的试验外，还需进行附加制动器在有载工况下的制动试验，而这种试验对扶梯是有较大损伤的，尤其对梯级曳引链链片将产生强烈的冲击。此外，该梯为室外型扶梯，3 年的运行对梯级曳引链链片也将产生一定的腐蚀损伤。

综合上述分析，基本可以确定，造成梯级曳引链链片断裂的原因有三条：第一，选用的梯级曳引链安全系数不足，这是主要原因；第二，型式试验对梯级曳引链造成损伤；第三，链片防腐处理不好，多年的运行对链片造成了损伤。三个因素最终导致了梯级曳引链链片断裂事故的发生。

5 梯级曳引链的监督检验分析

自动扶梯属特种设备，梯级曳引链是其中的重要部件，在 TSG T7005-2012《电梯监督检验和定期检验规则—自动扶梯与自动人行道》“附录 A 自动扶梯及自动人行道监督检验和定期检验内容、要求与方法”中提出了以下方面的有关要求：[5]

“自动扶梯及自动人行道制造单位应提供以下技术资料：

(1) 产品质量证明文件，注有制造许可证明文件编号、产品编号、主要技术参数，含有电子元件的安全电路(如果有)、可

编程电子安全相关系统(如果有)、驱动主机、控制柜的型号和编号，以及梯级或者踏板等承载面板、梯级(踏板)链的型号，并且在证明文件上有自动扶梯与自动人行道整机制造单位的公章或者检验专用章以及制造日期；(2) 含有电子元件的安全电路(如果有)、可编程电子安全相关系统(如果有)、梯级或者踏板等承载面板、驱动主机、控制柜、梯级(踏板)链的型式试验证书；对于玻璃护壁板，还应当提供采用了钢化玻璃的证明；”

由此可见，梯级曳引链的监督检验是通过查验制造厂家提供的梯级曳引链的型式试验合格证或型式试验报告，图 3 所示为某梯级曳引链的型式试验合格证，从中可以看出，该合格证中仅仅注明了梯级曳引链的型号及材质等参数，链片的厚度及宽度均未提及。

适用参数范围和配置表

节距 mm	133.33	梯级(踏板)距 mm	400
链板材质牌号	40Cr	滚子材质牌号	/
销轴材质牌号	20CrMo	套筒材质牌号	20Cr
工作环境	室内/室外		

附表说明：

当附表所列的参数范围和配置发生变更时，应重新进行型式试验。

图 3 某梯级曳引链的型式试验证书

图 4 及图 5 所示为某梯级曳引链的型式试验报告，从中可以看出，该试验报告中也仅仅注明了梯级曳引链的型号及材质等参数，链片的厚度及宽度也均未提及。

一、样机(样品)配置及技术参数表

节距	133.33 mm	梯级/踏板距	400 mm
链板材质	40Cr	滚子材质	/
链板硬度	36~40HRC	滚子硬度	/
套筒材质	20Cr	销轴材质	20CrMo
套筒硬度	56~60HRC	销轴硬度	56~60HRC
抗拉强度	≥135 kN	梯级/踏板距精度	±0.20 mm
链长同步精度	≤0.20 mm	梯级/踏板距同步精度	≤0.20 mm
工作环境	室内/室外		

二、样机(样品)检查与试验

序号	项目编号	试验项目	试验结果	结论
1	AA6.1	最小破断负荷(P) 梯级(踏板)链最小破断负荷须符合 JB/T 8545 的规定或者申请单位给出的技术要求。企业要求为至少 135kN。	P=151.85kN 链条(未)破断	合格
2	AA6.2	几何精度 1) 梯级/踏板距精度(L1) 梯级/踏板距长度公差为公差长度值的 0.1%，或符合企业制定的技术要求，企业要求为不得大于 ±0.20 mm。 2) 链长同步精度(L2) 链长同步精度不应超过 0.30 mm，或符合企业制定的技术要求，企业要求为不得大于 0.20 mm。 3) 梯级/踏板距同步精度(L3) 梯级/踏板距同步精度不应超过 0.30 mm，或符合企业制定的技术要求，企业要求为不得大于 0.20 mm。	L1=-0.07 (mm) L2=0.05 (mm) L3=0.07 (mm)	合格

图 4 某梯级曳引链的型式试验报告第 1 页

序号	项目编号	试验项目	试验结果	结论
3	AA6.3	铭牌 在梯级(踏板)链上应当设有铭牌(可识别标志), 标明以下内容: (1) 产品型号(链号); (2) 制造单位名称或者商标; (3) 产品编号或者制造批次号; (4) 制造日期。	符合要求	合格

附录:

1. 试验样品照片:



2. 试验情况说明:

本次型式试验属于一致性核查, 选取《电梯型式试验规则》(TSG T7007-2022) 规定的部分项目进行了试验。

3. 型式试验报告变更情况:

无

图 5 某梯级曳引链的型式试验报告第 2 页

综合上述梯级曳引链型式试验合格证及报告来看, 其中的参数无法做到与实物对应, 即制造厂家不论选用重型梯级曳引链还是轻型梯级曳引链, 均可以同一种梯级曳引链型式试验合格证及报告来完成自动扶梯的监督检验。而监督检验人员由于无法从合格证及报告中判定出所交验的梯级曳引链是否为该

型自动扶梯整机型式试验同样的配置。这一情况导致了梯级曳引链监督检验的缺失。

6 梯级曳引链监督检验的建议

通过上述对梯级曳引链强度校核的计算及梯级曳引链型式试验合格证及报告的分析, 为避免该类事故的再次发生, 结合笔者对本次监督检验所做的思考, 笔者对梯级曳引链的监督检验提出以下一些建议, 供同行们参考。

(1) 对梯级曳引链型式试验合格证及报告中的参数再增加链片的厚度及宽度等参数, 不同的厚度及宽度等参数的梯级曳引链应重新进行型式试验, 以方便后续整梯监督检验时对梯级曳引链的控制。

(2) 扶梯整机的型式试验对相关重要部件型号的填写应保证制造厂家具有与实物一一对应的关系, 以杜绝鱼目混珠。

(3) 对经过整机型式试验的自动扶梯, 监督检验时应增加对其中受损的部件进行更换或修复的强制性要求。

参考文献:

[1] GB/T2089-1994《圆柱螺旋压缩弹簧》P3.
[2] 秦大同, 谢里阳主编. 现代机械设计手册(第 2 卷)[M]. 化学工业出版社, 2011:10-27.
[3] 秦大同, 谢里阳主编. 现代机械设计手册(第 1 卷)[M]. 化学工业出版社, 2011:4-63.
[4] GB16899-2011《自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》P14.
[5] TSG T7001-2023《电梯监督检验和定期检验规则》P7.