



中 国 电 梯 协 会 标 准

T/CEA 3023.2—2025

自动扶梯桁架技术

第 2 部分：桁架结构计算

Technical specification for supporting structure of escalator

Part 2: Supporting structure calculation

2025-08-28 发布

2026-03-01 实施

中国电梯协会 发布

目 次

前言.....	II
引言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 计算模型与边界条件.....	2
5 极限状态设计法.....	4
6 结构分析与稳定性分析.....	7
7 极限状态设计法的载荷组合与结果评价.....	9

前 言

本文件是自动扶梯桁架技术的系列标准，分以下几个部分：

第1部分：桁架结构设计；

第2部分：桁架结构计算。

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件所要求达到的性能指标，应由采用本文件的制造企业在设计制造过程中自行进行验证测试，并对销售的产品作产品符合性声明。

本文件由中国电梯协会提出并归口。

本文件负责起草单位：蒂升扶梯有限公司、康力电梯股份有限公司。

本文件参加起草单位：蒂升电梯（中国）有限公司、通力电梯有限公司、广州广日电梯工业有限公司、奥的斯电梯制造有限公司、杭州西奥电梯有限公司、日立电梯（广州）自动扶梯有限公司、苏州市远极智能科技有限公司、广东省特种设备检测研究院中山检测院、苏州江南嘉捷电梯有限公司、巨人通力电梯有限公司、建研机械检验检测（北京）有限公司（国家电梯质量检验检测中心）、安川双菱电梯有限公司、巨龙电梯有限公司、快意电梯股份有限公司、申龙电梯股份有限公司。

本文件主要起草人：涂平昊、杨立勇、黄新宇、李立春、石丹超、华刚、许开胜、孙元满、左东林、罗佳伦、王鹏、符立峰、尹志炜、李宵香、时浩南、屠晓剑、黄思立、李嘉、黄炜。

引 言

自动扶梯作为现代城市建筑与公共空间的重要垂直运输设备,其结构安全性关乎人员通行效率与公共安全保障。近年来,交通枢纽及大型商业综合体等多样化应用场景的快速发展,对自动扶梯桁架结构的承载能力、抗震性能及长期稳定性提出了更高要求。当前行业实践中,相关设计规范在桁架结构计算的系统性整合方面尚有优化空间,边界条件设定、载荷组合规则及稳定性分析方法需进一步统一,以提升设计效率、优化工程成本控制。为适应行业发展需求,推动技术标准的协调统一,制定科学、可操作的桁架结构计算规范具有重要意义。

本文件以国家现行规范《GB 50068—2018 建筑结构可靠性设计统一标准》、《GB 16899 自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范》等为基础,结合自动扶梯桁架的实际工程经验,系统梳理了结构计算的核心技术要求,主要包括:

- 1) 计算模型与边界条件:针对静载、抗震及风载等工况,提供约束设定的参考原则;
- 2) 极限状态设计方法:细化承载能力与正常使用极限状态的设计流程,明确载荷组合的指导性规则;
- 3) 结构稳定性分析;
- 4) 结果评价标准:对挠度、应力等关键指标提出限值参考,兼顾安全性与经济性。

通过本文件的推广应用,可为设计单位、制造企业及检测机构提供技术参考,助力行业设计水平的整体提升,促进自动扶梯桁架结构在安全、高效、经济等维度的协调发展。

自动扶梯桁架技术 第2部分 桁架结构计算

1 范围

本文件适用于新制造的在中国地区使用的自动扶梯桁架产品。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 7024—2008 电梯、自动扶梯、自动人行道术语
- GB 16899 自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范
- GB/T 33582—2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则
- GB 50009—2012 建筑结构荷载规范
- GB/T 50011—2010 建筑抗震设计标准（2024年版）
- GB 50017—2017 钢结构设计标准
- GB 50068—2018 建筑结构可靠性设计统一标准
- GB 55001—2021 工程结构通用规范
- GB 55002—2021 建筑与市政工程抗震通用规范
- GB 55006—2021 钢结构通用规范

3 术语和定义

3.1

结构 structure

能承受作用并具有适当刚度的由各连接部件有机组合而成的系统。

3.2

设计状况 design situations

表征一定时段内实际情况的一组设计条件，设计应做到在该组条件下结构不超越有关的极限状态。

3.3

持久设计状况 persistent design situation

在结构使用过程中一定出现，且持续期很长的设计状况，其持续期一般与设计使用年限为同一数量级。

3.4

短暂设计状况 transient design situation

在结构施工和使用过程中出现概率较大，而与设计使用年限相比，其持续期很短的设计状况。

3.5

载荷工况 load case

为特定的验证目的，一组同时考虑的固定可变作用、永久作用、自由作用的某种相容的载荷布置以及变形和几何偏差。

3.6

极限状态 limit states

整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求，此特定状态为该功能的极限状态。

3.7

承载能力极限状态 ultimate limit states

对应于结构或结构构件达到最大承载力或不适于继续承载的变形的状态。

3.8

正常使用极限状态 serviceability limit states

对应于结构或结构构件达到正常使用的某项规定限制的状态。

3.9

基本组合 fundamental combination

承载能力极限状态计算时,永久载荷和可变载荷的组合。

3.10

标准组合 characteristic/nominal combination

正常使用极限状态计算时,采用标准值或组合值为载荷代表的组合。

3.11

抗力 resistance

结构或结构构件承受作用效应和环境影响的能力。

3.12

作用的标准值 characteristic value of an action

作用的主要代表值。可根据对观测数据的统计、作用的自然界限或工程经验确定。

3.13

一阶线弹性分析 first order linear-elastic analysis

基于线性应力-应变或弯矩-曲率关系,采用弹性理论分析方法对初始结构几何形体进行的结构分析。

3.14

二阶线弹性分析 second order linear-elastic analysis

基于线性应力-应变或弯矩-曲率关系,采用弹性理论分析方法对已变形结构几何形体进行的结构分析。

3.15

直接分析法 direct analysis method of design

直接考虑结构稳定性和强度性能有显著影响的初始几何缺陷、残余应力、材料非线性、节点连接刚度等因素,以整个结构体系为对象进行二阶非线性分析的设计方法。

4 计算模型与边界条件

4.1 一般规定

计算模型与边界条件应符合:

- 1) 自动扶梯桁架的有限元模型约束施加,应符合实际安装条件;
- 2) 根据约束类型选择施加方式;
- 3) 约束区域应能准确反映桁架实际约束情况;
- 4) 自动扶梯桁架不应视为建筑结构的一部分。

4.2 不同情况下的桁架约束

4.2.1 计算静载时的边界条件。桁架不考虑地震作用和风载荷时,可参考表1所示。

4.2.2 计算抗震设计时的边界条件

端部支撑中一个支承为固定支承,其他的支承应设计为在水平可移动。支承状态应为静定。

地震情况下,如果将桁架的下端支承固定,并为了避免因水平平面方向的层间位移,使自动扶梯的桁架与建筑物的横梁等发生碰撞,将非固定支承两侧横向位移约束住,边界条件可参考表1所示。

4.2.3 计算承受风载荷时的边界条件

承受风载荷时,如仅约束-X侧横向位移时,边界条件可参考表1所示。

表 1 参考边界条件

计算静载时的边界条件						
坐标轴	-X 方向一侧			+X 方向一侧		
	下端	中支(如有)	上端	下端	中支(如有)	上端
X	自由	自由	固定	自由	自由	固定
Y	固定	固定	固定	自由	自由	自由
Z	固定	固定	固定	固定	固定	固定
计算抗震设计时的边界条件						
坐标轴	-X 方向一侧			+X 方向一侧		
	下端	中支(如有)	上端	下端	中支(如有)	上端
X	固定	固定	固定	自由	自由	自由
Y	固定	自由	自由	固定	自由	自由
Z	固定	固定	固定	固定	固定	固定
计算承受风载荷时的边界条件						
坐标轴	-X 方向一侧			+X 方向一侧		
	下端	中支(如有)	上端	下端	中支(如有)	上端
X	固定	固定	固定	自由	自由	自由
Y	固定	固定	固定	自由	自由	自由
Z	固定	固定	固定	固定	固定	固定

5 极限状态设计法

5.1 一般规定

应选用极限状态设计法设计和计算自动扶梯桁架。

根据实际载荷选择载荷类型，如扶梯桁架结构静力学分析常用的载荷包括重力载荷、额定载荷等。桁架上的各种作用，当在时间和空间上可认为是相互独立时，则每一种作用可分别作为单个作用；当某些作用密切相关且有可能同时以最大值出现时，也可将这些作用一起作为单个作用。同时施加在结构上的各单个作用对结构的共同影响，应通过作用组合来考虑；对不可能同时出现的各种作用，不应考虑其组合。

载荷大小、方向和作用区域应符合实际载荷情况。经过试验验证的载荷信息宜作为数据积累，为载荷施加参考。

对每一种作用组合，桁架设计均应采用其最不利的效应设计值进行。

5.2 极限状态

在桁架计算中应对不同极限状态分别进行计算或验算，需要考虑的极限状态可分为承载能力极限状态和正常使用极限状态。对各极限状态的计算不得超过其限制。极限状态应符合下列规定：

- 1) 当桁架或其构件出现下列状态之一时，应认定为超过了承载能力极限状态：
 - a) 结构构件或连接因超过材料强度而破坏，或因过度变形而不适于继续承载；
 - b) 结构或结构构件丧失稳定；
 - c) 结构因局部破坏而发生连续倒塌；
 - d) 结构或构件的疲劳破坏。
- 2) 当桁架或其构件出现下列状态之一时，应认定为超过了正常使用极限状态：
 - a) 影响正常使用或外观的变形；
 - b) 影响正常使用的局部破坏。

5.3 设计状况

桁架设计应区分下列设计状况：

- 1) 持久设计状况，适用于结构使用时的正常情况；
- 2) 短暂设计状况，适用于结构出现的临时情况，包括制造、运输、安装和维修时的情况等；
- 3) 地震设计状况，适用于结构遭受地震时的情况。结构应符合相关抗震设计标准的规定。

5.4 极限状态设计

对本文件第5.3条规定的设计状况，应分别进行下列极限状态设计：

- 1) 对所有设计状况均应进行承载能力极限状态设计；
 - 2) 对持久设计状况应进行正常使用极限状态设计；
 - 3) 对短暂设计状况和地震设计状况可根据需要进行正常使用极限状态设计；
- 进行承载能力极限状态设计时，应根据不同的设计状况采用下列作用组合：
- 1) 对于持久设计状况或短暂设计状况，应采用作用的基本组合；
 - 2) 对于地震设计状况，应采用作用的地震组合。
- 进行正常使用极限状态设计时，应采用作用的标准组合。

5.4.1 永久载荷

应考虑下面自动扶梯桁架中的永久载荷。如需把载荷简化，假设应合理。

- 1) 桁架自重
桁架自重可在有限元分析软件中根据重力加速度自动计算。
- 2) 各组件分布载荷
自动扶梯其他系统组件的自重，包括扶手系统、导轨系统、梯级、梯级链、驱动装置、围裙、内外盖板以及楼层板等和其它附属设施的分布载荷。
- 3) 集中载荷
集中载荷包括主机、主驱动轴、扶手传动轴、张紧装置、扶手端部回转轮和控制柜等，这些载荷以集中载荷方式作用于分析模型。

5.4.2 自动扶梯的结构额定载荷

根据GB 16899的规定，自动扶梯桁架设计的支承结构应能够支撑自动扶梯或自动人行道的自重加上5000 N/m²的结构额定载荷。

结构额定载荷视为桁架计算中的一种可变载荷。它在有限元分析过程中，也应以均布载荷的形式加载到下水平段、倾斜段和上水平段。

5.5 雪载荷

根据GB 50009—2012的规定，全国各地雪载荷标准值远低于自动扶梯的结构额定载荷。同时考虑到自动扶梯上存在大量积雪时无法通行，雪载荷与结构额定载荷不会同时作用，故计算中可不予考虑。

5.6 风载荷

对于受侧向风压的室外型自动扶梯，可按照风力等级10级的风压条件设计。同时也应保证在风力等级8级的风压条件下自动扶梯能正常运行。也可由建筑物设计方或所有者提供当地基本风压值和地面粗糙度类别，并写入合同。

计算风载荷标准值时，宜参考建筑物的围护结构，并按照下式计算：

$$\omega_k = \beta_{gz} \mu_{sl} \mu_z \omega_0 \# \dots \dots \dots (1)$$

式中，

ω_k —风载荷标准值(kN/m²)；

β_{gz} —高度z处的阵风系数；

μ_{sl} —风载荷局部体型系数，可参考图1确定；

μ_z —风压高度变化系数，应按表3确定；

ω_0 —基本风压(kN/m²)。

阵风系数应按表2 阵风系数 β_{gz} 表2确定。

表 2 阵风系数 β_{gz}

离地面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.65	1.70	2.05	2.40
10	1.60	1.70	2.05	2.40
15	1.57	1.66	2.05	2.40
20	1.55	1.63	1.99	2.40
30	1.53	1.59	1.90	2.40
40	1.51	1.57	1.85	2.29
50	1.49	1.55	1.81	2.20
60	1.48	1.54	1.78	2.14
70	1.48	1.52	1.75	2.09
80	1.47	1.51	1.73	2.04
90	1.46	1.50	1.71	2.01
100	1.46	1.50	1.69	1.98

离地面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
150	1.43	1.47	1.63	1.87
200	1.42	1.45	1.59	1.79
250	1.41	1.43	1.57	1.74
300	1.40	1.42	1.54	1.70
350	1.40	1.41	1.53	1.67
400	1.40	1.41	1.51	1.64
450	1.40	1.41	1.50	1.62
500	1.40	1.41	1.50	1.60
550	1.40	1.41	1.50	1.59

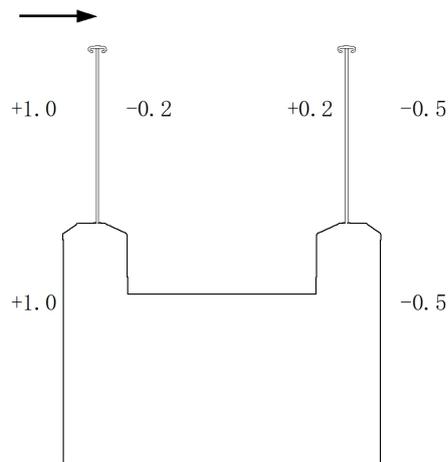


图1 风载荷局部体型系数

表3 风压高度变化系数 μ_z

离地面或海平面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.09	1.00	0.65	0.51
10	1.28	1.00	0.65	0.51
15	1.42	1.13	0.65	0.51

20	1.52	1.23	0.74	0.51
30	1.67	1.39	0.88	0.51
40	1.79	1.52	1.00	0.60
50	1.89	1.62	1.10	0.69
60	1.97	1.71	1.20	0.77
70	2.05	1.79	1.28	0.84
80	2.12	1.87	1.36	0.91
90	2.18	1.93	1.43	0.98
100	2.23	2.00	1.50	1.04
150	2.46	2.25	1.79	1.33
200	2.64	2.46	2.03	1.58
250	2.78	2.63	2.24	1.81
300	2.91	2.77	2.43	2.02
350	2.91	2.91	2.60	2.22
400	2.91	2.91	2.76	2.40
450	2.91	2.91	2.91	2.58
500	2.91	2.91	2.91	2.74
>550	2.91	2.91	2.91	2.91

地面粗糙度可分为A、B、C、D四类：A类指近海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；B类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇；C类指有密集建筑群的城市市区；D类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。

对于安装于山区的自动扶梯，风压高度变化系数除按照平坦地面的粗糙度类别由上表确定外，还应考虑地形条件的修正。

6 结构分析与稳定性分析

6.1 一般规定

桁架结构的内力和变形可按结构静力学方法进行弹性或弹塑性分析。节点连接设计和疲劳设计等可参考GB 50017—2017的相关规定。

结构的计算模型和基本假定应与构件连接的实际性能相符合。

进行桁架杆件内力计算时应符合下列规定：

- 1) 计算桁架杆件轴力时可采用节点铰接假定；
- 2) 采用节点板连接的桁架腹杆及载荷作用于节点的弦杆,其杆件截面为单角钢、双角钢或T形钢时,可不考虑节点刚性引起的弯矩效应；
- 3) 除无斜腹杆的空腹桁架外,直接相贯连接的钢管结构节点,应当符合GB 50017第13章各类节点的几何参数适用范围且主管节间长度与截面高度或直径之比不小于12、支管杆间长度与截面高度或直径之比不小于24时,可视为铰接节点；
- 4) H形或箱形截面杆件的内力计算宜符合GB 50017第8.5节的规定。

结构内力分析可采用一阶弹性分析、二阶P-Δ弹性分析或直接分析,应根据下列公式计算的最大二阶效应系数 $\theta_{i,max}^{II}$ 选用适当的结构分析方法。当 $\theta_{i,max}^{II} \leq 0.1$ 时,可采用一阶弹性分析;当 $0.1 < \theta_{i,max}^{II} \leq 0.25$ 时,宜采用二阶P-Δ弹性分析或采用直接分析;当 $\theta_{i,max}^{II} > 0.25$ 时,应增大结构的侧移刚度或采用直接分析。

一般结构的二阶效应系数可按式(2)计算:

$$\theta_{i,max}^{II} = \frac{1}{\eta_{cr}} \# \dots \dots \dots (2)$$

式中: η_{cr} ——整体结构最低阶弹性临界载荷与载荷设计值的比值。

二阶P-Δ弹性分析应考虑结构整体初始几何缺陷的影响,直接分析应考虑初始几何缺陷和残余应力的影响。

6.2 初始缺陷

结构整体初始缺陷模式可按最低阶整体屈曲模态采用。桁架各方向上的初始几何缺陷代表值的最大值 Δ_0 应参考制造允许最大公差值确定。

构件的初始缺陷代表值可按式(3)计算确定,该缺陷值包括了残余应力的影响。

$$\delta_0 = e_0 \sin \frac{\pi x}{l} \# \dots \dots \dots (3)$$

$$q_0 = \frac{8N_k e_0}{l^2} \# \dots \dots \dots (4)$$

式中:

δ_0 —离构件端部x处的初始变形值;

e_0 —构件中点处的初始变形值 (mm);

x—离构件端部的距离 (mm);

l—构件的总长度 (mm);

q_0 —等效分布载荷 (N/mm);

N_k —构件承受的轴力标准值 (N)。

构件初始弯曲缺陷值 $\frac{e_0}{l}$,当采用直接分析不考虑材料弹塑性发展时,可按表4取构件综合缺陷代表值;当采用直接分析考虑材料弹塑性发展时,应按照GB 50017相关条款考虑构件初始缺陷。

表4 构件综合缺陷代表值

对应于GB 50017 表7.2.1-1和表7.2.1-2中的柱子曲线	二阶分析采用的 $\frac{e_0}{l}$ 值
a类	1/400
b类	1/350
c类	1/300
d类	1/250

6.3 一阶弹性分析

桁架的内力和位移计算采用一阶弹性分析时,应按照GB 50017相关规定进行构件及连接和节点设计。

6.4 二阶 P-Δ 弹性分析

采用仅考虑 P-Δ 效应的二阶弹性分析时,应考虑结构的整体初始缺陷,计算结构在各种载荷或作用设计值下的内力和标准值下的位移,并按照 GB 50017 相关规定进行构件及连接和节点设计。

6.5 直接分析

直接分析法应考虑二阶 P-Δ 和 P-δ 效应,同时考虑结构和构件的初始缺陷,并按照 GB 50017 相关规定进行构件及连接和节点设计。

7 极限状态设计法的载荷组合与结果评价

7.1 承载能力极限状态的载荷组合与结果评价

自动扶梯桁架承载能力极限状态设计应符合下列规定:

- 1) 作用组合应为可能同时出现的作用的组合;
- 2) 每个作用组合中应包括一个主导可变作用或一个地震作用。必须计算由结构额定载荷作为第 1 个可变载荷的载荷组合的效应设计值;
- 3) 应采用下列设计表达式进行设计:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \# \dots \dots \dots (5)$$

式中,

γ_0 —结构重要性系数,可参考表 5 的规定。安全等级可参考 GB 50068 的规定确定,但不宜低于安全等级二级;

表 5 结构重要性系数 γ_0

结构 重要性系数	对持久设计状况和短暂设计状况			对 地震设计状况
	安全等级			
	一级	二级	三级	
γ_0	1.1	1.0	0.9	1.0

S_d —载荷组合的效应设计值;

R_d —结构构件抗力的设计值,应按照 GB 50017 的规定确定。

对持久设计状况和短暂设计状况,应采用作用的基本组合。载荷基本组合的效应设计值 S_d ,假设其载荷与载荷效应为线性关系,按下式计算:

$$S_d = \sum_{i \geq 1} \gamma_{G_i} S_{G_{ik}} + \gamma_P S_P + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} S_{Q_{1k}} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q_j} \gamma_{L_j} \varphi_{c_j} S_{Q_{jk}} \# \dots \dots \dots (6)$$

式中,

γ_{G_i} —第 i 个永久载荷的分项系数,应按照表 6 选用;

表 6 自动扶梯桁架的作用分项系数

适用情况 作用分项系数	当作用效应对 承载力不利时	当作用效应对 承载力有利时
γ_G	1.3	≤ 1.0
γ_P	1.3	≤ 1.0
γ_Q	1.5	0

γ_p —预应力作用的分项系数

γ_{Q_j} —第j个可变载荷的分项系数，其中 γ_{Q_1} 一般为结构额定载荷 Q_1 的分项系数；

γ_{L_j} —第j个可变载荷考虑使用年限的调整系数，应按本文件表7的有关规定采用，桁架设计使用年限不宜高于50年；

表7 自动扶梯桁架结构设计使用年限的载荷调整系数 γ_L

桁架设计使用年限（年）	5	50	100
γ_L	0.9	1.0	1.1
注：当设计使用年限不为表中数值时，调整系数 γ_L 可按线性内插确定			

$S_{G_{i,k}}$ —第i个永久作用标准值的效应；

S_p —预应力作用有关代表值的效应；

$S_{Q_{j,k}}$ —第j个可变作用标准值的效应，其中 $S_{Q_{1,k}}$ 一般为结构额定载荷的效应；

φ_{c_j} —第j个可变载荷的组合值系数。结构额定载荷的组合值系数不宜小于0.7，风载荷的组合值系不宜小于0.6。对地震设计状况应参考相关标准进行计算。

7.2 正常使用极限状态的载荷组合与结果评价

对于正常使用极限状态，应确保自动扶梯的正常运行，并符合下列规定：

- 1) 应计算包含永久和可变载荷标准值产生的挠度。该挠度不应大于支撑距离的1/400。
- 2) 应计算可变载荷标准值产生的挠度，不应大于支撑距离的1/500。
- 3) 应计算GB 16899中规定的：根据结构额定载荷计算的最大挠度，不应大于支承距离的1/750。
- 4) 按照T/CEA 301-2023规定，对于公共交通重载型自动扶梯和自动人行道，结构额定载荷计算的最大挠度不应大于支承距离的 1/1500。
- 5) 根据不同的设计要求，采用载荷的标准组合，并按下列设计表达式进行设计：

$$S_d \leq C \# \dots \dots (7)$$

式中，

C —设计对变形等规定的相应限制，由上述规定或有关结构设计标准的规定采用。

标准组合的效应设计值 S_d ，假设其载荷与载荷效应为线性关系，按下式进行计算：

$$S_d = \sum_{i \geq 1} S_{G_{i,k}} + S_p + S_{Q_{1,k}} + \sum_{j > 1} \varphi_{c_j} S_{Q_{j,k}} \# \dots \dots (8)$$

中国电梯协会标准
自动扶梯桁架技术 第2部分 桁架结构计算
T/CEA 3023.2—2025

*

中国电梯协会
地址：065000 河北省廊坊市金光道61号
Add: 61 Jin-Guang Ave., Langfang, Hebei 065000, P.R. China
电话/Tel: (0316) 2311426, 2012957
传真/Fax: (0316) 2311427
电子邮箱/Email: info@cea-net.org
网址/URL: <http://www.elevator.org.cn>