

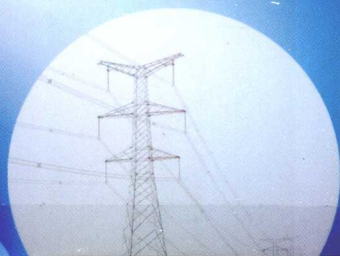
Experimental study and Electrical Engineering Application  
of Q460 high-strength Steel

# Q460

## 高强钢试验研究

## 及电力工程应用

郭咏华 张天光 王经远 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Experimental study and Electrical Engineering Application  
of Q460 high-strength Steel

# Q460

## 高强钢试验研究

# 及电力工程应用

郭咏华 张天光 王经运 著



NLIC 2970701349



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

Q460 高强钢是输电线路铁塔领域应用的一种新型材质。全书共分为 12 章, 内容包括 Q460 高强钢的特点、Q460 角钢压杆力学性能、Q460 角钢局部屈曲和整体稳定、Q460 高强钢的连接、Q460 高强钢铁塔真型试验、Q460 高强钢铁塔设计参数及选用原则、Q460 高强钢铁塔加工及电力工程应用。

本书可供从事送电线路工程铁塔研究、设计、加工、施工和运行工作的技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

Q460 高强钢试验研究及电力工程应用 / 郭咏华, 张天光, 王经运著. —北京: 中国电力出版社, 2010.12

ISBN 978-7-5123-1224-1

I. ①Q… II. ①郭…②张…③王… III. ①高强度钢—试验—研究②高强度钢—应用—输电铁塔—研究 IV. ①TG142.7  
②TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 252095 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.5 印张 200 千字

印数 0001—2000 册 定价 30.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

在电网建设中,采用 Q460 高强钢铁塔可取得良好的经济效益和社会效益,但受使用原则、设计方法、生产及加工工艺等技术难题的影响,Q460 高强钢铁塔的推广应用仍存在一些困难。本书作者及其合作者对 Q460 高强钢的工程应用及其各项性能进行了深入系统的理论分析和试验研究,取得了一系列研究成果,主要包括以下几个方面:

通过 Q460 高强角钢的压杆稳定试验、焊接和热加工试验、螺栓和接头试验、孔壁承压试验、真型塔试验,结合相关规范和有限元分析,系统研究了 Q460 高强角钢的各项性能,首次提出了 Q460 高强钢铁塔的设计参数及设计公式,完善了设计方法。

通过 Q460 高强钢焊接和热加工试验,首次总结出一套完善的焊接和热加工工艺,用以指导 Q460 高强钢的焊接和热加工,解决了 Q460 高强钢的焊接和热加工问题。

首次进行了 Q460 高强钢铁塔的设计及工程应用,取得了良好的经济效益和社会效益,目前 Q460 高强钢铁塔运行情况良好,证明本书作者研究的设计方法和设计参数安全可靠。

结合实际工程和试验研究结果,对 Q460 高强钢铁塔的加工技术进行了研究,总结出一套完善的 Q460 高强钢铁塔加工方法,保证了铁塔的加工质量。

结合实际工程对 Q460 高强钢铁塔技术经济指标进行了深入的分析,为推广应用 Q460 高强钢铁塔提供了有力支撑。

本书著述成果有利于实现我国电网建设的技术跨越和产业升级,提高整个输电行业高强钢铁塔应用水平,同时对带动我国钢材质量的不断提升,促进我国钢铁工业的技术进步具有重要意义,应用前景广阔。

## 前 言

多年来,我国输电铁塔钢材主要以 Q235、Q345 热轧角钢为主,与国际先进国家相比,我国输电铁塔材质较单一、强度值偏低,致使我国设计的铁塔重量偏大、经济效益和社会效益偏低。Q460 高强钢铁塔的推广应用,可带来巨大的经济效益和社会效益,经过多年的研究与工程实践,Q460 高强钢铁塔已在我国输电线路多个试点工程中得到应用。

Q460 高强钢铁塔是作者及其合作者历经多年研究成功的经济效益和社会效益均较优的新型铁塔。同普通强度铁塔相比,Q460 高强钢铁塔的设计参数、设计方法及加工技术要求等方面均具有特殊性。多年的试验研究、理论分析和工程应用,证明 Q460 高强钢铁塔安全可靠,具有明显的经济效益和社会效益,值得进一步推广应用。

本书总结了作者及其合作者多年从事 Q460 高强钢铁塔研究及工程应用的成果。全书共分 12 章,第 1 章对输电铁塔中高强钢应用情况及应用过程中需要解决的问题进行了概括总结,第 2 章介绍了 Q460 高强钢的特点,第 3 章介绍了 Q460 角钢轴心受压杆件力学性能,第 4 章介绍了 Q460 角钢两端偏心受压杆件力学性能,第 5 章介绍了 Q460 角钢一端偏心受压杆件力学性能,第 6 章介绍了 Q460 角钢局部屈曲性能及计算方法,第 7 章介绍了 Q460 角钢受压杆件稳定系数计算方法,第 8 章介绍了 Q460 高强钢的连接方法及相关注意事项,第 9 章介绍了 Q460 高强钢铁塔的设计参数及选用原则,第 10 章介绍了 Q460 真型塔设计情况及试验研究情况,第 11 章介绍了 Q460 高强钢铁塔的加工方法及其注意事项,第 12 章介绍了 Q460 高强钢铁塔工程应用情况及其技术经济指标。

本书作者为河南省电力勘测设计院郭咏华、张天光和王经运。张天光撰写第 1 章,郭咏华撰写第 2~9 章,王经运撰写第 10~12 章。全书由郭咏华统稿审定。

河南省电力勘测设计院的庞可、曹志民、韩为民、张晓辉、赵金丽、周昉、杨晓持、邓锦辉,中国电力科学研究院的徐德录、张东英、李茂华、韩钰、邢海军、常建伟、何长华、耿景都、丁平,西安建筑科技大学的郝际平、王先铁、曹

现雷，重庆大学的李正良等参与完成了本书有关科研试验工作；河南省电力公司的于旭东、华中电网公司的张云对本书作者给予了大力支持，作者在此一并表示感谢。

由于水平所限，本书不妥和需进一步完善之处，尚祈工程技术界的同仁不吝赐教指正。

**作 者**

2010年11月

## 目 录

序  
前言

<b>1</b>	<b>绪论</b> .....	1
1.1	概述 .....	1
1.2	国内输电铁塔现状 .....	1
1.3	国内外标准中钢材强度等级情况 .....	1
1.4	国内外输电铁塔中高强度钢应用情况 .....	2
1.5	Q460 高强度铁塔的工程应用需要解决的问题 .....	3
<b>2</b>	<b>Q460 高强度钢的特点</b> .....	5
2.1	概述 .....	5
2.2	Q460 角钢压杆的整体稳定性能 .....	5
2.3	缺陷对等边单角钢轴心受压构件稳定承载力的影响 .....	9
<b>3</b>	<b>轴心压杆力学性能</b> .....	14
3.1	概述 .....	14
3.2	轴心压杆试验研究 .....	14
3.3	有限元分析方案及结果 .....	29
3.4	轴心压杆稳定承载力设计方法 .....	41
3.5	结论 .....	45
<b>4</b>	<b>两端偏心压杆力学性能</b> .....	46
4.1	概述 .....	46
4.2	两端偏心压杆试验研究 .....	46
4.3	有限元分析方案及结果 .....	59
4.4	两端偏心压杆稳定承载力设计方法 .....	68
4.5	结论 .....	70

<b>5</b>	<b>一端偏心压杆力学性能</b> .....	72
5.1	概述 .....	72
5.2	一端偏心压杆试验研究 .....	72
5.3	有限元分析方法及结果 .....	86
5.4	一端偏心压杆稳定承载力设计方法 .....	92
5.5	结论 .....	95
<b>6</b>	<b>局部屈曲</b> .....	97
6.1	概述 .....	97
6.2	局部屈曲试验研究 .....	97
6.3	有限元分析方法及结果 .....	103
6.4	强度折减系数设计方法 .....	105
<b>7</b>	<b>稳定系数</b> .....	108
7.1	概述 .....	108
7.2	国内规范计算方法 .....	108
7.3	ASCE10—1997《美国输电铁塔设计导则》计算方法 .....	110
7.4	结论 .....	112
<b>8</b>	<b>Q460 铁塔的连接</b> .....	113
8.1	概述 .....	113
8.2	螺栓连接 .....	113
8.3	焊接连接试验研究 .....	132
<b>9</b>	<b>设计参数和选用原则</b> .....	149
9.1	概述 .....	149
9.2	设计参数 .....	149
9.3	受拉角钢使用原则 .....	151
9.4	受压高强角钢使用原则 .....	151
<b>10</b>	<b>真型塔设计与试验研究</b> .....	155
10.1	真型塔试验介绍 .....	155
10.2	试验结果与分析 .....	157
<b>11</b>	<b>Q460 铁塔的加工</b> .....	159
11.1	概述 .....	159
11.2	热加工试验研究 .....	159
11.3	Q460 铁塔冷加工工艺研究 .....	163
11.4	结论 .....	165



<b>12 工程应用</b> .....	166
12.1 概述.....	166
12.2 工程应用情况.....	166
12.3 经济效益比较.....	166
12.4 社会效益分析.....	169
12.5 结论.....	169
<b>参考文献</b> .....	171

# 绪 论

## 1.1 概 述

随着我国冶金工业的不断发展,高强度钢材制造质量提高较快且日趋稳定,这在一定程度上使输电铁塔采用更高强度钢材成为可能。在线路工程中采用 Q460 高强钢铁塔(简称 Q460 铁塔)可取得良好的经济效益和社会效益,有利于提高我国电网建设技术水平。

## 1.2 国内输电铁塔现状

长期以来,我国输电线路铁塔用材主要以 Q235 和 Q345 热轧角钢为主,与国际先进国家相比,我国输电铁塔所用钢材的材质单一、强度值偏低、材质的可选择余地小<sup>[1~2]</sup>。随着我国电力需求的不断增长,同时由于我国土地资源紧缺以及环保要求提高,线路路径选取、沿线房屋等设施的拆迁问题也日趋严重,大容量、高电压等级输电线路得到了迅速发展,出现了同塔多回路线路,以及更高电压等级的交流 750、1000kV 及直流±800kV 输电线路。所有这些使得铁塔趋于大型化,杆塔设计荷载也越来越大,常用热轧角钢在强度和规格上都难以满足大荷载杆塔的使用要求。

大荷载杆塔可以使用组合截面角钢,但组合截面角钢风载体型系数较大,杆件数量及规格多,节点构造复杂,连接板、构造板用量多,安装复杂,大大增加了工程建设投资。钢管塔存在构造复杂、焊缝质量不易控制、加工生产效率低、管材价格及加工成本高、塔厂加工设备投入大等缺点。

多年的铁塔设计工作,使铁塔的型式已经趋于完善化,要进一步节省造价,只能从材质上入手。

## 1.3 国内外标准中钢材强度等级情况

现将部分有代表性的钢材标准列入表 1-1 中,可以看出,目前我国最新规范

已经有高强度钢材相关规定，但由于我国高强钢的应用起步较晚，且高强钢在输电铁塔领域应用研究较少，目前还没有大范围推广应用。与国外先进国家相比，我国输电铁塔用角钢强度值偏低、材质可选择余地小，使得我国设计的铁塔往往大而重，也使得我们在国外投标工程中往往处于劣势。

表 1-1 国内外标准中最大强度等级的钢材

国名	标准标号	钢号	屈服点 (N/mm <sup>2</sup> )	钢种或用途
美国	ASTM	A852	485	低合金钢
		A572	450	高强度钢
英国	BS 4360	55C-E	450	低合金钢
日本	JIS G3101	SS540	400	一般结构钢
	JIS G 3106	SM 570	460	焊接结构钢
	JIS G 3444	STK 540	390	一般结构钢管
	JIS G 3114	SMA-570	460	焊接耐候钢
	JIS G 3445	STKM 17-C	480	钢管
	JIS G 3129	SH590	440	铁塔用高拉力钢材
	JSS II 12—1999	JS690S	520	铁塔用高拉力型钢
苏联	TOCT 9281—73	10XCH	392	低合金钢
		12H2M $\phi$ A10	686	高强度钢
中国	GB 50017—2003	Q420	420	低合金钢
	GB/T 1591—2008	Q690	690	低合金结构钢
	GB 16270—2009	Q960	960	高强度结构钢，仅钢板

冶金工业信息标准研究院联合有关单位制定了 YB/T 4163—2007《铁塔用热轧角钢》，该标准于 2007 年 9 月 1 日正式实施，首次为 Q460 角钢的制造和工程应用提供了依据。

#### 1.4 国内外输电铁塔中高强钢应用情况

国外，日本在 20 世纪 90 年代相继建成四段同塔双回路共 425km 的 1000kV 线路中，辅材采用角钢 SS41 或 STK41（屈服强度 255MPa）型钢，主材采用钢管 SS55 或 STK55（屈服强度 415MPa）；日本 JEAC 6001—2000《架空送电规程》又将钢材屈服强度提高到 520MPa（JS690S 钢）；欧美国家大多采用 A36、G50、GR65（屈服强度为 450MPa）等级的钢材。

国内, 2002 年华东电力设计院设计的 500kV 黄浦江吴淞口大跨越工程跨越钢管塔就首次采用了 Q390 钢材, 主要用在塔身下面四段主材, 该跨越塔塔高 177.5m, 管径 1000mm, 壁厚 24mm; 上海维蒙特工业(中国)有限公司采用美国标准 ASTM A572 GR65 在上海宝钢生产了屈服强度为 450 MPa 的钢材, 已用于国内 220kV 线路钢管杆和 500kV 变电构架; 2005 年, 在 750kV 官亭—兰州东输电线路中, 成功采用了 Q420 高强角钢, 使用了 Q420 高强钢的 JG2 型转角塔还成功通过了真型试验, 试验数据与计算分析相当符合, 表明 Q420 高强钢在铁塔结构中使用是安全可靠的, Q420 角钢已经大量应用于包括 1000kV 线路在内的众多线路, 许多塔厂有了加工经验; 2007 年至今, 本书作者及其合作者在平顶山—洛南、华豫发电厂—信阳变电站、禹州发电厂—许昌、焦西—塔铺、庄周一永城和平顶山—白河等 6 条 500kV 线路工程中成功设计应用了 Q460 铁塔, 部分线路已运行一年以上, 运行情况均良好, 表明将本书推荐的 Q460 铁塔的设计理论应用于实际工程是安全可靠的。

## 1.5 Q460 高强钢铁塔的工程应用需要解决的问题

### 一、Q460 高强钢受压杆件(简称压杆)设计方法和设计参数

由于钢材强度的提高, 构件的抗力分项系数、强度折减系数、稳定系数等设计参数和相关设计方法均相应变化, 目前国内普通材质压杆承载力设计方法和设计参数已相当成熟, 但不能直接用于 Q460 高强钢。

Q460 高强钢压杆的承载力主要和杆件的换算长细比、宽厚比和边界条件有关。Q460 高强钢压杆根据边界条件不同可分为 3 种情况: 一端偏心、两端偏心和一端轴心。相同的杆件, 由于边界条件不同, 其承载力不同。

### 二、Q460 高强钢的生产

输电线路铁塔要求角钢的冲击性能达到 B 级, Q460 高强角钢 B 级别冲击实验值偏低, 保证能力不强, 控制不好时, 生产中会出现不能达到 B 级的情况, 有降级处理问题。降级后的 A 级角钢没有用户, 会给生产企业造成极大浪费。

目前, 对于大型钢铁企业来说, 高强度钢材的生产已不再困难, 钢材质量提高较快且日趋稳定, 使输电线路杆塔采用高强度钢材成为可能。

### 三、Q460 高强钢铁塔的连接

Q460 高强钢铁塔的连接主要有焊缝连接和螺栓连接两种形式。高强钢在焊接过程中, 热影响区容易形成淬火组织——马氏体, 使近缝区的硬度提高, 塑性下降, 导致焊后发生裂纹, 易形成冷裂纹、层状撕裂。普通强度钢材螺栓连接的计

算方法和构造要求不能直接用于 Q460 高强钢铁塔的设计。

#### 高塔四、Q460 高强钢铁塔加工工艺

Q460 高强钢铁塔的剪切、制孔、制弯、镀锌等主要工序与普通钢材有所不同，在工程应用过程中需要对铁塔加工工艺进行详细规定。

表 1 Q460 高强钢主要性能指标及加工工艺要求

性能指标	技术要求
屈服强度	≥460 MPa
抗拉强度	510~630 MPa
伸长率	≥18%
冲击功	≥30 J
硬度	≤160 HV
镀锌层厚度	≥60 g/m <sup>2</sup>
焊接性能	符合 GB 50661 要求
疲劳性能	符合 GB 50661 要求
耐腐蚀性能	符合 GB 50661 要求
低温性能	符合 GB 50661 要求

## Q460 高强钢的特点

### 2.1 概 述

在大负荷铁塔设计中, Q460 钢材由于强度高, 一方面可在一定程度上有效避免主材双肢, 减少双肢所需的构造单元, 使塔重减轻; 另一方面, 也在一定程度上减少了基础作用力, 相应塔型还可以适当减小根开, 以节约占地和适应山地的需要。同时铁塔选材规格小, 相应减小了塔材的挡风面积, 从而减小了塔身风荷载, 形成了铁塔受力的良性循环, 最终使塔材规格小、重量轻、节约占地, 达到降低工程造价的目的。

但由于国内对 Q460 钢材各项性能的研究起步较晚, 目前 Q460 铁塔尚未在全国范围内推广应用。本章将对 Q460 高强钢的稳定性能进行详细分析。

### 2.2 Q460 角钢压杆的整体稳定性能

由于 Q460 角钢压杆构件偏心的影响, 其承载力差别较大。在实际工程设计中, 通过构件长细比修正系数, 将两端偏心压杆和一端偏心压杆构件进行长细比修正, 然后按轴心受压构件进行设计, 多年的工程实践证明, 该方法安全有效。本节仅以轴心受压构件为例, 对 Q460 角钢受压构件整体稳定性能进行理论分析。

#### 2.2.1 屈曲状态

等边单角钢为单轴对称截面, 其轴心受压时的屈曲状态分为整体屈曲和局部屈曲, 整体屈曲又可分为弯曲屈曲和弯扭屈曲<sup>[3]</sup>。

##### 一、整体屈曲

(1) 弯曲屈曲。对无缺陷的轴心受压构件, 当压力较小时, 构件保持顺直, 或存在微弯形式, 随压力增加, 弯曲变形增大而使构件丧失承载力。这种变形称为构件的弯曲屈曲。

(2) 弯扭屈曲。当轴力达到某一临界值, 角钢可能发生绕非对称轴弯曲变形, 也可能发生绕对称轴弯曲变形, 同时伴随有扭转变形, 而使构件丧失承载力。这种变形称为构件的弯扭屈曲。

## 二、局部屈曲

在轴心压力作用下, 角钢双肢都承受压力。如果双肢的宽度较大, 而厚度相对较薄时, 就可能在构件丧失整体稳定或强度破坏之前, 各自先发生局部屈曲, 即双肢板件偏离其原来的平面位置而发生波状鼓屈。局部屈曲可能导致构件较早地丧失承载力。

### 2.2.2 弹性屈曲

(1) 弹性弯曲屈曲。轴心压杆承载能力的极限状态是丧失稳定, 完善弹性直杆失稳的临界力可以由著名的欧拉公式算得

$$N_{cr} = \pi^2 EI / (\mu l)^2 = \pi^2 A / \lambda^2 \quad (2-1)$$

式中  $\mu$ ——构件的计算长度系数<sup>[4]</sup>。

式(2-1)是杆件能够继续保持直线平衡形式的极限荷载, 超过这一荷载后杆件就发生弯曲变形。

(2) 弹性弯扭屈曲。等边单角钢是单轴对称截面, 丧失直线形式的平衡并不一定是由直变弯, 也可能弯曲和扭转同时发生, 即弯扭屈曲。只有一个对称轴的等边单角钢截面, 剪心  $s$  和形心  $c$  不重合(见图 2-1)。当杆件绕对称轴  $cy$  弯曲时, 产生的剪力不经过截面剪心, 必然导致杆件扭转。

图 2-2 (a) 所示的等边单角钢轴心受压构件截面绕对称轴有弯曲变形 [见图 2-2 (b)], 绕纵轴有扭转变形 [见图 2-2 (c)]。

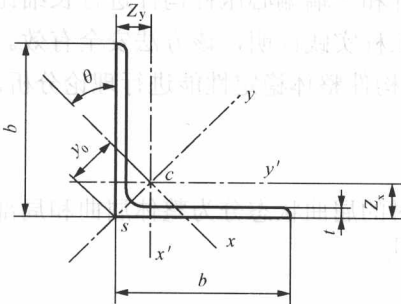


图 2-1 等边单角钢截面

$z_x, z_y$ —重心距离;  $b$ —肢宽;

$t$ —肢厚;  $c$ —形心

离左端距离为  $z$  处截面剪心的位移  $u$ , 扭转角为  $\varphi$ 。采用两套坐标系, 一套是与原构件相对应的固定坐标系  $oxy$ , 另一套是与变形后构件相对应的移动坐标系  $o'\xi\eta\zeta$ 。由于侧向位移  $u$  较小,  $xz$  平面内的曲率可以用  $u''$  表示, 而截面的扭转角  $\varphi$  也较小, 因此  $\xi\zeta$  平面内的曲率  $\xi''$  与  $xz$  平面内的曲率相同, 即  $\xi'' = u''$ 。图 2-2 (d) 表示隔离体上的诸力, 在右侧截面上作用有一轴线压力  $P$ , 而形心的位移为  $u + y_0 \sin \varphi \approx u + y_0 \varphi$ 。

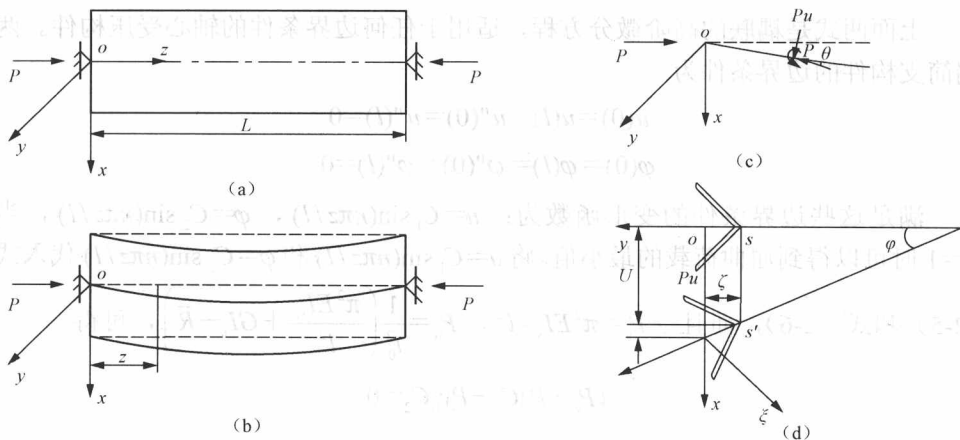


图 2-2 等边角钢轴心受压构件的弯扭变形

(a) 受力简图; (b) 弯曲变形; (c) 扭转变形; (d) 隔离体受力示意图

由图 2-2 知在  $\xi\zeta$  平面内的弯矩平衡条件为  $-EI_{\eta}\xi'' = -EI_y u'' = P(u + y_0\varphi)$ , 于是可得弯矩的平衡方程

$$EI_y u'' + Pu + Py_0\varphi = 0 \quad (2-2)$$

截面绕纵轴弯曲时, 纵轴的倾角为  $\theta$ , 因而在形心  $o'$  处产生一切力  $P\sin\theta \approx P\tan\theta \approx Pu'$ . 由图 2-2 (c) 可知, 此切力不通过截面的剪心  $s'$ , 而是绕剪心形成一逆时针方向的力矩  $Pu'y_0\cos\varphi \approx Pu'y_0$ . 截面上任意点离剪心的距离为  $\rho = \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2}$ . 构件扭转时, Wagner 效应为

$$\begin{aligned} \int_A (\sigma + \sigma_r) \rho^2 dA\varphi' &= \int_A (\sigma + \sigma_r) [x^2 + (y - y_0)^2] dA\varphi' \\ &= \sigma(I_x + I_y + Ay_0^2)\varphi' + \int_A \sigma_r(x^2 + y^2) dA\varphi' \\ &= Pi_0^2\varphi' + \bar{R}\varphi' \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中,  $i_0^2 = (I_x + I_y) / A + y_0^2$ ,  $\bar{R} = \int_A \sigma_r(x^2 + y^2) dA$ .

此时截面的非均匀扭矩应为  $Pi_0^2\varphi' + \bar{R}\varphi' + Pu'y_0$ , 于是可得扭矩的平衡方程

$$EL_w\varphi'' + (Pi_0^2 - GI_t + \bar{R})\varphi' + Pu'y_0 = 0 \quad (2-4)$$

对式 (2-2) 微分两次, 对式 (2-4) 微分一次后得到

$$EI_y u'''' + Pu'' + Py_0\varphi'' = 0 \quad (2-5)$$

$$EL_w\varphi''' + (Pi_0^2 - GI_t + \bar{R})\varphi'' + Pu''y_0 = 0 \quad (2-6)$$



上面两式是耦联的高阶微分方程，适用于任何边界条件的轴心受压构件。两端简支构件的边界条件为

$$u(0)=u(l)=u''(0)=u''(l)=0$$

$$\varphi(0)=\varphi(l)=\varphi''(0)=\varphi''(l)=0$$

满足这些边界条件的变形函数为： $u=C_1 \sin(n\pi z/l)$ ， $\varphi=C_2 \sin(n\pi z/l)$ ，当  $n=1$  时可以得到屈曲荷载的最小值。将  $u=C_1 \sin(n\pi z/l)$  和  $\varphi=C_2 \sin(n\pi z/l)$  代入式

(2-5) 和式 (2-6)，而且令  $P_y=\pi^2 EI_y/l^2$ ， $P_w=\frac{1}{i_0^2} \left( \frac{\pi^2 EI_w}{l^2} + GI_t - \bar{R} \right)$ ，可得

$$(P_y - P)C_1 - P_{y_0}C_2 = 0$$

$$-P_{y_0}C_1 + (P_w - P)i_0^2 C_2 = 0$$

$C_1$  和  $C_2$  有非零解的条件为其系数行列式为零，即构件的屈曲方程为

$$(P_y - P)(P_w i_0^2 - P i_0^2) - P^2 y_0^2 = 0 \quad (2-7)$$

$$\text{或} \quad [1 - (y_0/i_0)^2]P^2 - (P_y + P_w)P + P_y P_w = 0 \quad (2-8)$$

所以弯扭屈曲荷载为

$$P_{yw} = \frac{(P_y + P_w) - \sqrt{(P_y + P_w)^2 - 4P_y P_w [1 - (y_0/i_0)^2]}}{2[1 - (y_0/i_0)^2]} \quad (2-9)$$

$P_{yw}$  必然小于  $P_y$ ，也小于  $P_w$ ，构件发生弯扭失稳的条件是  $P_{yw}$  应小于绕截面非对称轴的弯曲屈曲荷载  $P_x = \pi^2 EI_x/l^2$ 。

令  $\lambda_w$  和  $\lambda_{yw}$  分别表示扭转屈曲与弯扭屈曲的换算长细比，将  $P_y = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_y^2}$ 、

$P_w = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_w^2}$  和  $P_{yw} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_{yw}^2}$  代入式 (2-9) 可得

$$\lambda_{yw} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \lambda_y^2 + \lambda_w^2 + \sqrt{(\lambda_y^2 + \lambda_w^2)^2 - 4\lambda_y^2 \lambda_w^2 (1 - y_0^2/i_0^2)} \right]} \quad (2-10)$$

当用式 (2-10) 确定  $\lambda_{yw}$  时，对于单轴对称的单角钢截面，其翘曲惯性矩用近似值  $I_w = 0$ ，其有利的误差一般不会超过 3%，这样  $P_w = GI_t/i_0^2$ ， $\lambda_w = \pi\sqrt{E/\sigma_w} = 5.07\sqrt{A/I_t} = 8.77i_0/t$ 。若  $\lambda_{yw} > \lambda_x$ ，构件将发生弯扭失稳；若  $\lambda_{yw} \leq \lambda_x$ ，构件将发生弯曲失稳。