 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i9.11577

Discussion on Structural Design of Light Steel Roof Photovoltaic Power Station

Junling Cao

Shanxi Installation Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030032, China

Abstract

With the implementation of the “double carbon” policy, the addition of photovoltaic power generation system on the roof has become the norm. However, the value of roof load in structural design is not clear in national codes and industry standards. Light-weight steel structure roofs such as portal frames are extremely sensitive to additional photovoltaic loads due to their light weight, and the design standards are not uniform due to the vague provisions of the code. After the specification is updated, whether the roof variable load includes the photovoltaic panel load has not been clearly defined. The load combination specification for snow removal conditions of roof photovoltaic systems is also not involved. In addition, the light steel roof structure is the ‘ foundation ‘ of the photovoltaic power generation system, and its fire and corrosion protection performance also needs to be matched with the photovoltaic system. At the end of this paper, the design process of portal frame structure is described in detail with practical engineering examples. This paper can be used for reference in the design and construction of this type of structure.

Keywords

light steel roof; photovoltaic panels; purlin; snow load

轻钢屋面光伏电站结构设计问题的探讨

曹军岭

山西省安装集团股份有限公司，中国 · 山西 太原 030032

摘　要

随着“双碳”政策落地，屋面上增设光伏发电系统成为常态。但是国家规范和行业标准对结构设计时屋面荷载取值并不明确。门式刚架等轻钢结构类屋面，由于其屋面自重轻，对附加光伏荷载极为敏感，而规范规定模糊，导致设计标准不统一。对于规范更新后，屋面可变荷载是否包含光伏板荷载在内未见明确规定。对于屋面光伏系统除雪工况荷载组合规范也未涉及。此外，轻钢屋面结构做为光伏发电系统的“基础”，其防火与防腐蚀性能也需要与光伏系统匹配。本文最后以实际工程举例，详述门式刚架结构设计过程。本文可供该类型结构设计施工时借鉴参考。

关键词

轻钢屋面；光伏板；檩条；雪荷载

1 引言

随着国家“碳达峰，碳中和”作为长期政策以及《建筑节能与可再生能源利用通用规范》[1]（GB55015-2021）实施，新旧建筑屋面增加光伏发电设施逐渐成为常态。详见图 1~ 图 2。门式刚架轻型房屋屋面附设光伏电站的结构设计缺少规范标准规定，屋面光伏除雪工况荷载取值及荷载组合规范标准也是滞后，导致不同设计单位的设计方法不同，同一设计单位设校审人员的设计理念也难达一致。另外由于光伏系统局部热斑和高压直流拉弧很容易引发火灾，但是对于直接支承光伏系统的屋面檩条及屋面板却没有相应的防火要求。本文对这些结构设计上的问题进行逐一探讨。

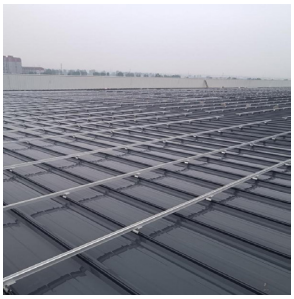


图 1 屋面光伏支架



图 2 安装完毕的光伏面板

2 主结构的计算

无论是新建建筑还是既有建筑，光伏电站的施工均落后于主体结构。所以主体结构的设计一般分两步。第一步，

【作者简介】曹军岭（1982–），男，中国河北隆尧人，硕士，高级工程师，一级注册结构工程师，从事建筑工程及结构抗震研究。

在无光伏板荷载的情况下，按照一般建筑进行设计计算，满足各种工况下的强度、刚度和稳定性要求。第二步，在增加光伏板等效荷载的情况下，进行整体结构的设计计算。由于缺乏规范标准，第二步的设计计算便有了不同的设计理念。

光伏板在屋面上大面积规则排布，一旦安装在设计工作年限内也不会随意改变。光伏板等效荷载可以考虑为恒荷载的一部分，一般取值在 0.15KN/m^2-0.2KN/m^2，不上人屋面活荷载按照《工程结构通用规范》[2]（GB55001-2021）取 0.5KN/m^2。这种设计理念暂称为第一种方法。对于新建建筑，第一种方法无可厚非。而对于既有建筑增设光伏电站，按照第一种方法计算原结构往往无法满足承载力要求。考虑到大面积的光伏板上面每平米 50 千克的附加外荷载不太可能，且由于《工程结构通用规范》把屋面活荷载由 0.3KN/m^2 提高到了 0.5KN/m^2，故此有些设计人把光伏系统的等效荷载做为不上人屋面活荷载的一部分考虑。即恒荷载只考虑原屋面自重，活荷载总共取 0.5KN/m^2 来验算既有结构。更有甚者，新建建筑屋面有光伏系统时也如此设计。这种方法记作第二种方法。

目前国家正在逐渐提高结构的安全性，在没有规范规定的情况下，新建建筑设计时建议采用第一种方法。这样处理尽管可能会提高造价，但是对结构安全性是必要的。而对于既有建筑，如果设计师采用第二种方法并为此承担相应责任，其它责任主体也应当给与认可。当然无论哪种方法，均需要另外考虑光伏板自重与风、雪荷载同时组合的工况。

3 檩条计算

跟主结构的计算类似，檩条计算也可以分为两步。第一步不考虑光伏板，验算檩条在各种组合下的强度、刚度和稳定性。下雪影响光伏板发电，在北方清理光伏板积雪是常见工况，而此时雪往往在光伏列阵低端外侧堆积。所以可以在第一步补充屋面自重及堆雪组合下的檩条计算。此堆雪荷载跟光伏电站积雪清扫方法有关，大小无法准确确定。设计时，在华北地区可按照基本雪压的二倍考虑，并应在设计文件中注明。

由于檩条受荷面积远小于主结构，在施工、检修及除雪期间承受各种极端工况的概率较大，所以第二步考虑光伏板荷载的组合工况时，光伏板自重做为恒荷载的一部分考虑，活荷载仍取 0.5KN/m^2。此时，檩条结构恒荷载及活荷载标准值总和 1.0KN/m^2 左右，与主体结构总体持平或略大。

4 雪荷载基准期

《工程结构通用规范》（GB55001-2021）规定一般建筑结构设计工作年限为 50 年，《建筑结构荷载规范》[3]（GB50009-2012）规定可变荷载的设计基准期为 50 年，《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》[4]（GB51022-2015）规定采用重现期为 100 年的雪荷载，而一般光伏电站的正常工作年限为 25 年。对于设屋面光伏电站的轻钢结构，雪荷载的重现期如何考虑？在不考虑光伏板荷载的情况下，主体结构进行第一步计算时，根据《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》必须采用重现期为 100 年的雪荷载进行组合。考虑光伏板荷载进行第二步设计计算时，如果光伏板做为恒载一部分，恒荷载及活荷载标准值总和由以前的约 0.6KN/m^2 提高到了约 1.0KN/m^2，即由恒活荷载各 0.3KN/m^2 左右提高到了各 0.5KN/m^2 左右。这就导致一般地区轻钢结构对雪荷载的敏感性降低。在规范无更新的情况下，如果百年一遇雪荷载不大于 0.5KN/m^2，含雪荷载组合一般不是控制组合，雪荷载重现期取 100 年即可。如果百年一遇雪荷载大于 0.5KN/m^2，恒荷载及雪荷载标准值总和会大于 1.0KN/m^2。这时雪荷载重现期取 100 年会带来工程投资的增加。在规范无变化的情况下，建议主体结构和屋面檩条一般计算时雪荷载重现期取 100 年。而在考虑除雪工况计算檩条时，由于堆雪荷载规范无规定且雪不可能堆集于光伏板上，可取不含光伏板的屋面板自重及重现期较短的基本雪压的 2 倍进行组合计算。除雪工况檩条承担的恒荷载及堆雪荷载标准值总和以约 1.0KN/m^2 为宜，既不增加工程投资，又可满足作业操作。

5 檩条防火

轻钢屋面光伏电站，檩条作为发电设备的“基础”，耐火极限如何考虑规范并无明确规定，而是取决于轻钢厂房建筑防火类规范规定。对于一般不考虑轴力的屋面檩条，按照《建筑钢结构防火技术规范》[5]（GB51249-2017）可归为第一类檩条，檩条失效仅会导致局部破坏，故此可不考虑该类屋面檩条的防火设计。而对于由建筑或工艺布置，明确需要考虑屋面耐火极限的项目，檩条必须考虑防火设计。可见屋面檩条是否考虑防火设计与屋面光伏系统没有必然联系。需要考虑防火设计的屋面檩条一般可喷涂膨胀型防火涂料，并根据计算确定涂料的等效热阻系数。檩条一般采用薄壁开口截面，该类构件的截面形状系数远大于普通型钢，即使耐火极限半小时，其计算所需的防火涂料等效热阻系数也比一般梁柱大。其防火涂装的可靠性需要进一步验证。

《建筑光伏系统应用技术标准》[6]（GB/T 51368-2019）规定，光伏电站应避开爆炸危险场所。对于甲、乙类厂房及仓库，内部有易燃易爆物，屋面多具有泄爆功能，而且光伏电站对于危险物的不确定性影响较大，故此甲、乙类厂房屋面不应增加光伏发电装置。对于火灾危险性类别为丙、丁、戊类的厂房与仓库，可以建设屋面光伏电站。

6 檩条防腐

防腐涂料的设计工作年限是指整个钢结构表面从建造至需要重新涂装的时间。防腐涂料应通过国内权威机构关于底漆干膜锌含量及耐老化测试的第三方检测报告。轻钢结构防腐蚀涂装的设计工作年限一般多为 10~15 年，而光伏电站设计工作年限为 25 年。结构涂装达到设计年限后，一般需要进行检测及评估，需要重新涂装的必须重新涂装。而对

于既有建筑增加光伏发电站，除了验算承载力极限状态和正常使用极限状态外，尚需要考虑耐久性极限状态的问题。既有建筑的检测鉴定除考虑承载力及变形外，尚应检测防腐涂装剩余使用年限问题，必要时重新喷涂防腐和防火涂料。

7 实例

中国山西省某新建项目，采用门式刚架轻型钢结构，柱距 7m，最大跨度 27m，总跨度 65m，柱顶标高为 8.0m。结构设计工作年限 50 年，重现期 50 年的基本风压 0.5KN/m^2，重现期 100 年的基本雪压 0.35KN/m^2。设防烈度 7 度，设计基本地震加速度 0.15g。屋面恒载 0.35KN/m^2，可变荷载 0.50KN/m^2，预留屋面光伏荷载 0.20KN/m^2，无吊车荷载。钢结构梁柱及屋面檩条等主材均采用 Q355B 级别钢材。柱截面采用焊接楔形柱，主要截面为 WH(300~500)×300×8×14 和 WH(300~450)×300×8×14。梁截面采用焊接楔形梁或等截面梁，主要截面为 WH(750~450)×300×8×14 及 WH450×200×6×10 等。檩条采用冷弯薄壁型钢截面，截面为 60° 斜卷边 Z200×70×20 连续檩条，支座处搭接。计算简图如图 3。

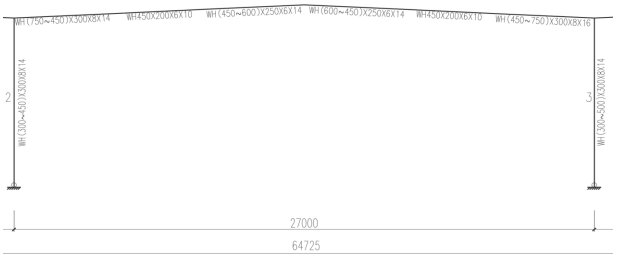


图 3 门刚结构计算简图

门式刚架梁面外计算长度系数取屋面系杆和隅撑的较小值，门式刚架柱考虑柱底板部分嵌固作用。经计算后，柱构件强度应力比 0.85，稳定应力比 0.87；梁构件强度应力比 0.90，稳定应力比 0.95。风载下柱顶位移 40mm，位移角 1/213，屋面挠度 127mm，屋面斜梁坡度改变率 0.31。均满足国家及行业标准要求。

主刚架的防火设计可由结构设计软件自动计算。由于屋面檩条耐火极限一般小于屋面梁，所以梁面外计算长度防火计算时取系杆间距。设置好梁柱的耐火等级、耐火极限和防火涂料参数后，软件可自动按照火灾时的荷载组合计算构件所需的涂料厚度或等效热阻系数。本项目屋面梁采用薄涂型防火涂料，耐火极限 1.5h，计算的等效热阻系数最大值为 0.50m^2*℃ /W，施工时需按照产品参数并现场试验确定涂层厚度，并不小于 1.5mm。

本项目防腐涂料系统设计工作年限不小于 15 年。梁柱构件表面应在彻底除锈后立即做防锈底漆，然后涂中间漆、面漆，具体要求为：环氧富锌底漆 2 道，干漆膜厚度 70μm；环氧云铁中间漆一道，干漆膜厚度 60μm；聚氨酯面漆 2 道，干漆膜厚度 70μm。除锈后到涂底漆的时间间隔不应超过 6 小时，在此期间表面应保持洁净，严禁沾水及油污等。施工环境相对湿度不应大于 85%，构件表面有结露时不得涂装。

本项目屋面包含光伏板预留的恒荷载及可变荷载总标准值为 1.05KN/m^2，而除雪工况总荷载取不含光伏板预留的恒荷载与两倍百年一遇雪荷载之和，正好也是 1.05KN/m^2。屋面檩条边跨 2.5mm 厚，中间跨 2.0mm 厚。最大强度应力 236N/mm^2，最大挠度 21mm，因为采用双层拉条，稳定应力较小，验算满足规范标准所有要求。屋面檩条采用热浸锌防腐，浸锌量为 275g/m^2。屋面板耐火极限建筑及工艺专业不做要求，檩条未涂防火涂料。

8 结尾

轻钢屋面上设计光伏电站，结构工程师必须慎重对待。设计计算中无论如何考虑荷载，必须在设计文件中注明。另外，设计方需要提示轻钢屋面光伏电站管理方制定对极端天气的应急方案，尤其是针对下雪后除雪措施的方案。这种方案应该考虑到轻钢屋面光伏电站与普通地面光伏电站的区别。轻钢屋面由于许用荷载小、自重轻、薄壁构件多、对雪荷载敏感等，除雪作业时，屋面局部荷载不得超过檩条的承载力。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑节能与可再生能源利用通用规范:GB55015—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程结构通用规范:GB55001—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.门式刚架轻型房屋钢结构技术规范:GB51022—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑钢结构防火技术规范:GB51249—2017[S].北京:中国计划出版社,2017.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑光伏系统应用技术标准:GB/T 51368—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.