

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.023

桥梁立柱与盖梁节点的抗震设计方法研究

袁慧玉, 徐佳

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 首先,介绍了地震作用下桥梁立柱与盖梁连接节点的传力机理和受力性能等研究成果;其次,分析对比了国内外设计规范标准关于节点主应力验算的具体规定,并探讨其中的受剪面积 A_{jv} 、承受立柱轴力作用的等效截面 A_{jn} 及混凝土立柱纵筋拉力 T_c 的取用;最后结合实际桥梁工程进行了计算分析。由分析结果可知:立柱纵向钢筋在节点核心区域内的锚固长度与节点的主应力数值大小密切相关,计算时应按实际的锚固长度计算;当配有预应力的盖梁与立柱节点中节点主压应力超限时,除了可以适当提高限值外,还可以通过调整其预应力度、立柱主筋锚固长度或盖梁高度等措施进行改善;另外在节点构造上可通过控制节点核心区域内横向箍筋的最小配筋率等措施来确保形成刚节点。

关键词: 抗震设计;节点;预应力;名义主拉应力;名义主压应力;名义剪应力

中图分类号: U442.5 + 5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0104-05

0 引言

在地震中桥梁立柱与盖梁节点是遭地震作用受损的部位之一。国外从 1971 年圣费尔南多地震之后,开始对高架桥梁节点进行研究,尤其在 1989 年的洛马普里塔地震中,柏树街双层高架桥约 1.4 km 长的区段倒塌,双层桥面的上层落至下层上^[1-2](见图 1、图 2),以及后来的美国北岭地震和日本神户地震,使各国都认识到桥梁节点抗震性能的重要性,并提出相关桥梁节点的抗震设计方法。1996 年, Priestley^[1]教授基于节点中传力机理,运用拉压杆理论提出了 FTM 设计方法,之后 Priestley 教授的学生 Sri Sritharan 基于 FTM 设计方法将节点的抗剪区域部分延伸到了盖梁以及立柱中,从而提出了 EFTM 设计方法。大量试验证明, EFTM 设计方法满足桥梁节点抗震设计的需要。2005 年, Sri Sritharan^[3]在 EFTM 设计方法的基础上考虑了预应力对混凝土节点的影响,提出了 MEFTM 设计方法。

1 立柱与盖梁节点的受力

在抗震设计中,对于房屋框架结构中的节点一般要求“强柱弱梁刚节点”,将塑性铰设置在梁端,以



图 1 柏林街双层高架桥倒塌图一

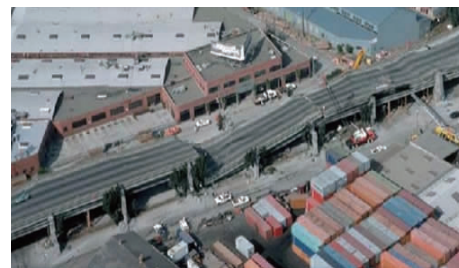


图 2 柏林街双层高架桥倒塌图二

减小框架结构的侧向位移,确保高层建筑的使用安全。而在桥梁结构中立柱与盖梁形成框架,若也将塑性铰设置在梁端,则会引起桥梁上部结构的破坏,进而导致桥梁失去交通功能。所以,在桥梁抗震框架结构中一般要求“强梁弱柱刚节点”。将塑性铰设置在立柱底或立柱顶,但由于桥梁立柱也是重要的承力构件,因此在地震作用下,需使立柱顶的位移或塑性铰的塑性转角满足最大容许值,以确保桥梁结构的抗震性能。

收稿日期: 2024-08-20

作者简介: 袁慧玉(1971—),女,学士,高级工程师,从事桥梁结构设计工作。

桥梁梁柱的结构形式一般有独柱盖梁、双柱盖梁、门架墩等,节点的形式大多为L形和T形。文献[4]采用数值模拟方法对典型框架墩的T形节点(见图3)的受力过程和影响节点极限强度的因素进行了分析研究。分析时,采用双线性模型和Mander约束混凝土模型来模拟T形节点结构中的钢筋和混凝土的应力-应变关系,通过改变主筋和箍筋配筋率来考虑主筋和箍筋配筋率对节点受力性能的影响。通过数值模拟分析,验证了节点受力的3种机制,即斜压杆机制、桁架机制和约束机制。研究表明:通过增加横梁预应力可以提高整个框架结构的横向抗震承载能力;通过在构造上增设立柱与盖梁相交处的承托,加大节点范围,可以有效改善立柱与盖梁相交处的局部应力集中,提高框架结构的整体抗震能力;通过合理设置盖梁与立柱抗弯刚度比值 $S=I_{beam}/I_{col}$,可以实现“强梁弱柱刚节点”的能力保护抗震设计原则。

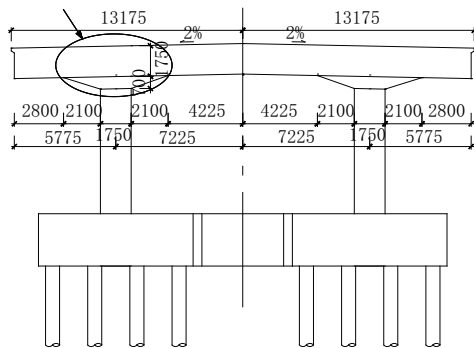


图3 典型框架桥墩(单位:mm)

为了达到框架墩延性抗震设计的目标,桥梁立柱与盖梁节点应该表现出比其所连接的构件较高水平的受力性能,应具备与其所连接的构件承受最不利荷载组合时所匹配的承载能力。而且,其性能也不应妨碍与其所连接的构件性能的充分发挥。同时,也应兼顾到便于节点混凝土的浇筑及振捣施工。

总之,节点作为连接立柱与盖梁的关键部位,一旦地震下发生破坏,修复难度极大,并将严重影响结构整体的受力性能,因此,应对节点进行能力保护构件设计。

2 节点主应力计算方法研究

我国抗震设计规范《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)^[11]、《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)^[6]和上海市《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440-2023)^[7]增加了节点抗震设计与构造的内容。

针对《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—

2023)^[7]第8.3节中节点主拉应力和主压应力计算公式(主应力示意图见图4)与AASHTO桥梁抗震设计规范^[8]和Caltrans加州运输局抗震设计标准^[9]进行比较,可以得出以下几点结论:

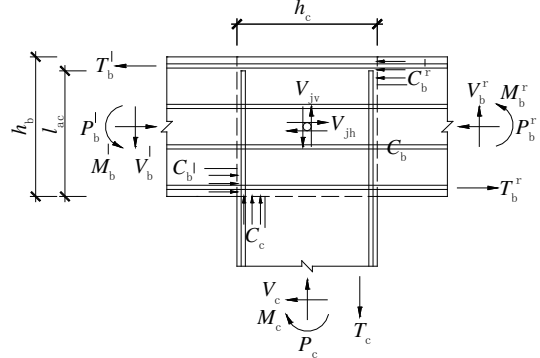


图4 T型节点受力图

(1)由节点传力机理可知,节点核心区混凝土所承受的剪力是由立柱主筋进而传递给箍筋的,名义剪应力采用以下公式计算:

$$v_{jv} = v_{jh} = \frac{T_c}{A_{jv}} \quad (1)$$

式中: T_c 为节点的名义剪力, A_{jv} 为节点的受剪面积。参考AASHTO^[8]和Caltrans^[9]抗震设计规范中 $A_{jv}=l_{ac}B_{cap}$ (l_{ac} 为立柱主筋伸入节点的锚固长度, B_{cap} 为盖梁宽度);而我国规范^[6-7]受剪面积采用 $h_b b_{je}$ (h_b 为盖梁高度, b_{je} 为盖梁宽度),对于立柱内主筋未延伸至盖梁顶的情况就不适用。

(2)节点竖直方向正应力采用以下公式计算:

$$f_v = \frac{P_c}{A_{jh}} \quad (2)$$

式中: P_c 为立柱的轴力; A_{jh} 为承受立柱轴力作用的等效截面,参考AASHTO^[8]和Caltrans^[9]抗震设计规范,应根据节点横梁与立柱连接的结构形式计算。当横梁与立柱连接形成T形节点时, $A_{jh}=(h_c+h_b)h_c$ (h_c 为墩柱横截面弯矩方向的高度, h_b 为盖梁高度);当横梁与立柱形成L形节点时, $A_{jh}=(h_c+0.5h_b)B_{cap}$ 。而我国规范^[6-7]的等效面积为 $b_c h_c$ (立柱横截面的宽度和高度)。

(3)公式中 T_c 定义为考虑超强系数 ϕ_0 的混凝土立柱纵筋拉力,该值在工程中采用有限元模型计算太复杂,参考文献[4]中指出可近似采用美国Priestley教授的研究,对 T_c 取近似值,公式如下:

$$T_c = 0.5 A_{sc} \lambda_0 f_{yc} \quad (3)$$

式中: A_{sc} 为立柱伸入节点的主筋面积, f_{yc} 为主筋抗拉强度屈服值, λ_0 为钢筋超强系数,取值1.2。

(4)对于节点主应力的限值,美国规范^[8-9]中关于

节点设计的理论及经验均来自于盖梁高度与立柱横向尺寸比 1~1.25 的框架结构节点,且主要是考虑钢筋混凝土结构,未考虑预应力对节点抗震能力的贡献,故,主应力的限值取值偏于保守,这点在文献[3]中已有论述。

3 算例

下面以某高架桥工程为例进行立柱与盖梁节点主拉应力和主压应力计算。

高架桥标准段桥宽 26.1 m(双向 6 车道),采用 3~4 跨一联的 30 m 简支变连续预制小箱梁。标准段上部结构每跨采用 6 片预制小箱梁,2 片边梁,4 片中梁,每片梁采用单支点支撑。梁高 1.6 m,梁间距 4.44 m。预制小箱梁顶、底板平行,底板宽 1.5 m,单箱单室,斜腹板斜率 1:4。下部结构采用双立柱+盖梁,立柱尺寸为 1.6 m(横桥向)×1.8 m(顺桥向),立柱中心处盖梁尺寸为 2.541 m(高)×1.8 m(宽),承台平面尺寸为 11.6 m(横桥向)×6.6 m(顺桥向),承台厚 2.4 m,桩基为 26 根 PHC 管桩。支座采用板式橡胶支座。标准段高架横断面布置详如图 5 所示。

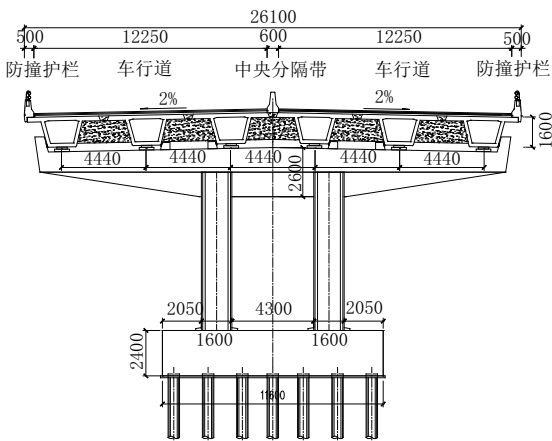


图5 标准段高架横断面图(单位:mm)

3.1 设防标准和性能目标

(1)地震动峰值加速度:依据《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7] 3.2.2 条取用地震动峰值加速度为 0.1g。

(2)抗震设防分类和设防目标^[7]:按 3.1.1 条,本高架属于城市快速路上的桥梁,抗震设防分类为乙类;采用两级抗震设防,按 3.1.2 条,抗震设防目标如表 1 所列。

高架桥墩高度在 14 m 左右,采用延性抗震体系进行设计,支座采用板式橡胶支座,设置限位块。对于按延性抗震体系进行设计的结构,结构所有构件在 E1 作用下应处在弹性状态;在 E2 作用下桥墩立

表 1 抗震设防目标

桥梁抗震设防类别	E1 地震作用		E2 地震作用	
	震后使用要求	结构损伤状态	震后使用要求	结构损伤状态
乙类	可正常使用	结构弹性工作,基本无损伤	限制交通 1 周	中小损伤

柱可进入塑性状态,基础、盖梁等应满足能力保护设计,墩顶位移需求应小于其位移能力。

3.2 设计加速度反应谱

场地类别为 IV 类,所属的设计地震分组为第二组。按照《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7] 5.2.1 及 5.2.2 条,分别采用 E1、E2 下的不同工程场地特征周期计算得到水平向设计加速度反应谱。

3.3 建模计算

采用有限元分析软件进行结构抗震计算分析,同时,为考虑结构相邻联的影响,建立 3 联 4×30 m 简支变连续小箱梁模型,取中间一联的计算结果,两侧边联的边墩采用施加集中质量的方式来考虑其余联对模型动力性能的影响。通过建立横向框架模型验算立柱屈服状态下的横向位移,采用 Push-Over 法进行分析计算。

标准梁段采用板式橡胶支座,且模型考虑了板式橡胶支座水平方向的刚度。

根据实际的桩基布置模拟边界条件,将群桩基础换算成承台底的 6 自由度刚度矩阵进行模拟。计算模型如图 6、图 7 所示。

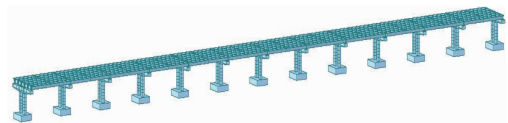


图6 桥墩整体抗震计算有限元模型图

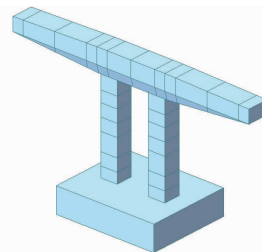


图7 Push-over 横向框架抗震计算模型图

根据《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7] 6.3 节规定,采用多振型反应谱的方法,对上述所建立的结构动力分析模型在 E1 和 E2 两个水准下的地震响应进行分析计算,使结构各个方向的有效振型参与质量均超过相应方向结构总质量的 90%。采用线性多自由度体系的 CQC 法进行振型组合。由于桥墩均为混凝土桥墩,将阻尼比取为 0.05,

采用单向地震动输入。

3.4 墩柱整体抗震分析计算结论

(1)在 E1 地震作用下,各桥墩均处于弹性状态,满足《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7]对 E1 地震下的桥墩抗震性能要求,E1 下抗震不控制设计。

(2)在 E2 地震作用下,所有支座均发生滑移,支座在纵桥向和横桥向设置抗震挡块,防止落梁发生。

(3)在 E2 地震作用下,桥墩纵横向均屈服,桥墩墩底纵横向弯矩响应大于截面等效屈服弯矩,按照延性抗震体系进行抗震设计。经计算,桥墩变形能力及墩身抗剪承载力均满足《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7]对桥墩在 E2 地震下的需求,具体数值见表 2。

表 2 桥墩 E2 地震响应及验算表

桥墩方向	位移验算		受压侧抗剪		受拉侧抗剪	
	实际位移/m	容许位移/m	剪力设计值/kN	抗力承载力/kN	剪力设计值/kN	抗力承载力/kN
顺桥向	0.141	0.158	2 129	5 440	—	—
横桥向	0.067	0.124	4 773	5 730	2 386	4 063

3.5 节点验算

按照《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7]8.3 节,以及本文对节点主应力计算的认识,在上述算例计算结果的基础上,对节点的名义主拉应力和名义主压应力进行计算。根据有限分析的计算结果,分别提取考虑超强系数的混凝土立柱纵筋拉力、立柱的轴力 P_c 、横梁的轴力 P_b (包括预应力产生的轴力)来验算节点名义主拉应力和名义主压应力。节点配筋图如图 8、图 9 所示。

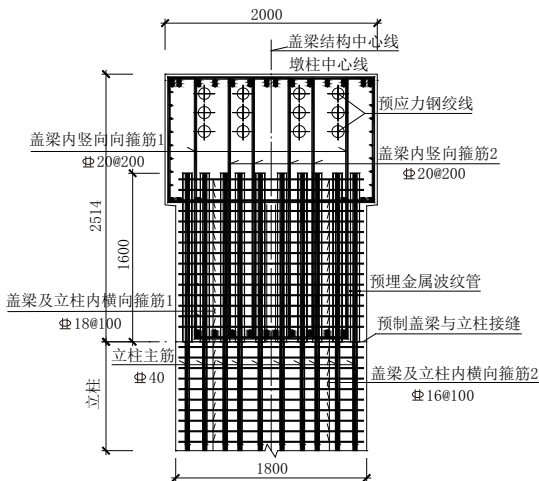


图 8 节点配筋横断面图(单位:mm)

主要计算过程如下。

(1)盖梁截面高 $h_b=2.541$ m;盖梁截面宽 $b_{je}=1.8$ m。

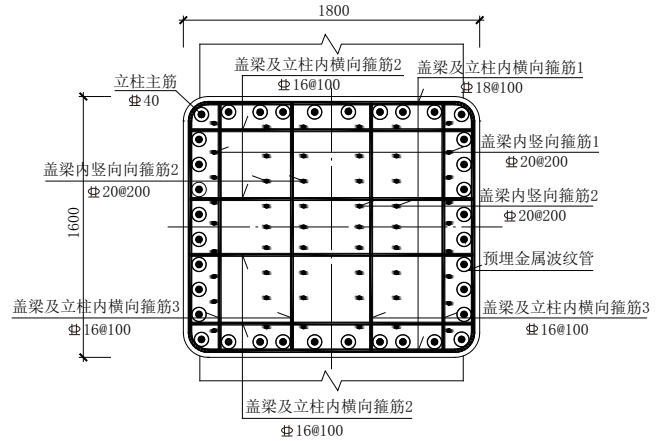


图 9 节点配筋平面图(单位:mm)

(2)立柱主筋延伸入盖梁的锚固长度 $l_{ac}=40d=1.6$ m, $d=40$ mm(立柱主筋直径)。

(3)立柱横截面高 $h_c=1.6$ m;立柱横截面宽 $b_c=1.8$ m。

(4)立柱受拉钢筋面积 $A_{sc}=45 239$ mm²,36 根直径 40 mm HRB400 钢筋;钢筋 f_{sk} 取 400 MPa。

(5)超强系数 $\phi_0=1.2$ 。

(6)考虑超强系数的混凝土立柱纵筋拉力按式(3)计算:

$$T_c = 0.5A_{sc} \phi_0 f_{yc} = 10 857 \text{ kN}$$

(7)按式(1)计算节点名义剪应力:

$$v_{jv} = \frac{T_c}{l_{ac} b_{je}} = 3.77 \text{ MPa}$$

(8)立柱的轴力 $P_c=21 160$ kN。

(9)节点沿竖直方向的正应力按式(2)计算:

$$f_v = \frac{P_c}{b_c(h_c + h_b)} = 2.839 \text{ MPa}$$

(10)盖梁节点处轴力 $P_b=45 104$ kN。

(11)节点沿水平方向的正应力按下式计算:

$$f_h = \frac{P_b}{b_{je} h_b} = 9.861 \text{ MPa}$$

(12)节点名义主拉应力按下式计算:

$$\sigma_t = \frac{f_h + f_v}{2} - \sqrt{\left(\frac{f_h - f_v}{2}\right)^2 + v_{jv}^2} = 1.2 \text{ MPa(压应力)}$$

最大值(盖梁采用 C60 混凝土): $1.23\sqrt{f_{cd}} = 1.23 \times \sqrt{26.5} = 6.18$ MPa(拉应力),未超出限值,满足《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)要求。

(13)节点名义主压应力按下式计算:

$$\sigma_c = \frac{f_h + f_v}{2} + \sqrt{\left(\frac{f_h - f_v}{2}\right)^2 + v_{jv}^2} = 11.5 \text{ MPa}$$

最大值: $0.38 f_{cd} = 0.38 \times 26.5 = 10.07$ MPa,超出限值,不满足《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7]。

预应力盖梁立柱节点名义主压应力现值的修

正:《桥梁抗震设计标准》(DG/TJ 08-2440—2023)^[7]和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)^[6]中关于立柱与盖梁节点的抗震内容均参考了 AASHTO 桥梁抗震设计规范^[8],其中,对节点主应力的限值均基于钢筋混凝土构件,而对于预应力混凝土构件则偏小。文献[3]认为采用 EFTM 设计方法对预应力混凝土节点来说过于保守,因此,在此基础上,提出了采用基于修正的 EFTM 模型(即 MEFTM 节点设计方法)对钢筋混凝土 T 形和 L 形节点及其有预应力加载的情况进行抗震计算,对面内地震荷载作用下的节点力传递需求进行了评估并对节点配筋进行了量化,给出了计算方法,并认为在预应力混凝土节点中,平均节点主压应力可适当提高,限制在 $0.3 f_c' = 0.46 f_{cd} = 12.1 \text{ MPa}$ 。按这个限值,计算的节点名义主压应力满足要求。

4 结 语

桥梁梁柱节点是连接盖梁与立柱的重要传力构件,是保证整个结构良好工作的关键部位,为能力保护构件。

本文将国内桥梁抗震规范,与美国桥梁抗震规范及相关文献中关于下部结构立柱与盖梁的节点主应力计算方法进行了对比分析,并结合实际工程进行了计算和验算,总结如下。

(1)节点名义剪应力计算中受剪面积的计算以及节点竖直方向正应力计算中承受立柱轴力作用等效面积取用美国规范方法更准确。国内规范关于节点名义剪应力的计算公式中默认钢筋锚固长度取值为盖梁的高度($l_{ac} = h_c$),当立柱钢筋未延伸至盖梁顶时应取实际的钢筋锚固长度 l_{ac} 进行计算。

(2)当计算节点的名义主压应力超限时可通过

结合预应力盖梁的受力情况适当降低其预应力度、增加立柱纵向主筋锚固长度以及增加盖梁高度等措施进行改善。

(3)对于配有预应力的盖梁与立柱的节点内主压应力的限制,规范取值偏小,建议可采用 MEFTM 节点设计方法中的取值 $0.46 f_{cd}$ 。但目前针对预应力盖梁立柱节点计算主压应力允许值的取值研究有限,尚需要进行更深入的研究,为规范编制及实际工程的应用提供技术支撑。

(4)另外,为了确保弱柱强梁刚节点,除了计算的内容,还需要在构造上来保证节点的抗震性能,如:控制节点内横向箍筋的最小配箍率以防止节点的斜拉破坏、盖梁竖向箍筋面积(立柱截面外一定范围内)、盖梁上下缘的附加钢筋及立柱内纵向钢筋伸入盖梁的锚固长度要求等影响节点抗震承载能力的因素。

参考文献:

- [1] Priestley, M.J.N., S., F., et al. Seismic Design and Retrofit of Bridges [M]. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- [2] 张洁, 李建中. 配箍方式对双层高架桥梁节点性能影响研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(5): 126-131.
- [3] Sri Sritharan. Improved Seismic Design Procedure for Concrete Bridge Joints[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(9): 1334-1343.
- [4] 宋凯. 桥梁节点部位的抗震分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] JTG/T 2231-01—2020, 公路桥梁抗震设计规范[M].
- [6] CJJ 166—2011, 城市桥梁抗震设计规范[M].
- [7] DG/TJ 08-2440—2023, 桥梁抗震设计标准[M].
- [8] Bridges T O S O, AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design[S]. 2nd Edition.
- [9] Caltrans S, Caltrans Seismic Design Criteria[S].
- [10] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [11] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[M].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com